

ISSN 1607-0763 (Print)  
ISSN 2408-9516 (Online)

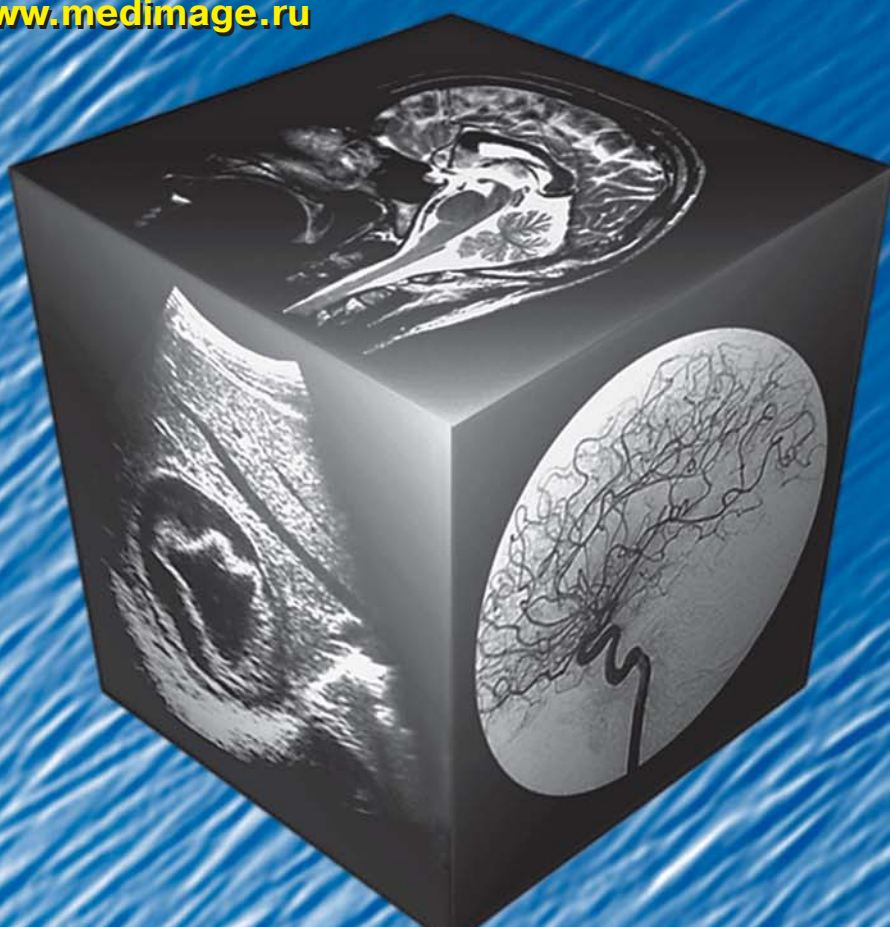
# МЕДИЦИНСКАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ

Medical Visualization

**Том 29 №1**  
**Vol 29 N1**

**2025**

[www.vidar.ru](http://www.vidar.ru)  
[www.medvis.vidar.ru](http://www.medvis.vidar.ru)  
[www.medimage.ru](http://www.medimage.ru)



**ВИДАР-М**

- Биомаркеры МРТ-перфузии при ишемии головного мозга у ликвидаторов аварии Чернобыльской АЭС
- Объемная КТ-перфузия печени при портальной гипертензии
- SWDS – новый параметр УЗ-диагностики воспалительных изменений в печени
- Выявление метастазов в печени с использованием Т1ВИ с КУ с эффектом переноса намагниченности
- Эластография почек у здоровых пациентов
- Блок индентификации кальцинатов в системе компьютерного анализа маммограмм
- Модель нейронной сети для выявления стенозов позвоночника на МР-томограммах

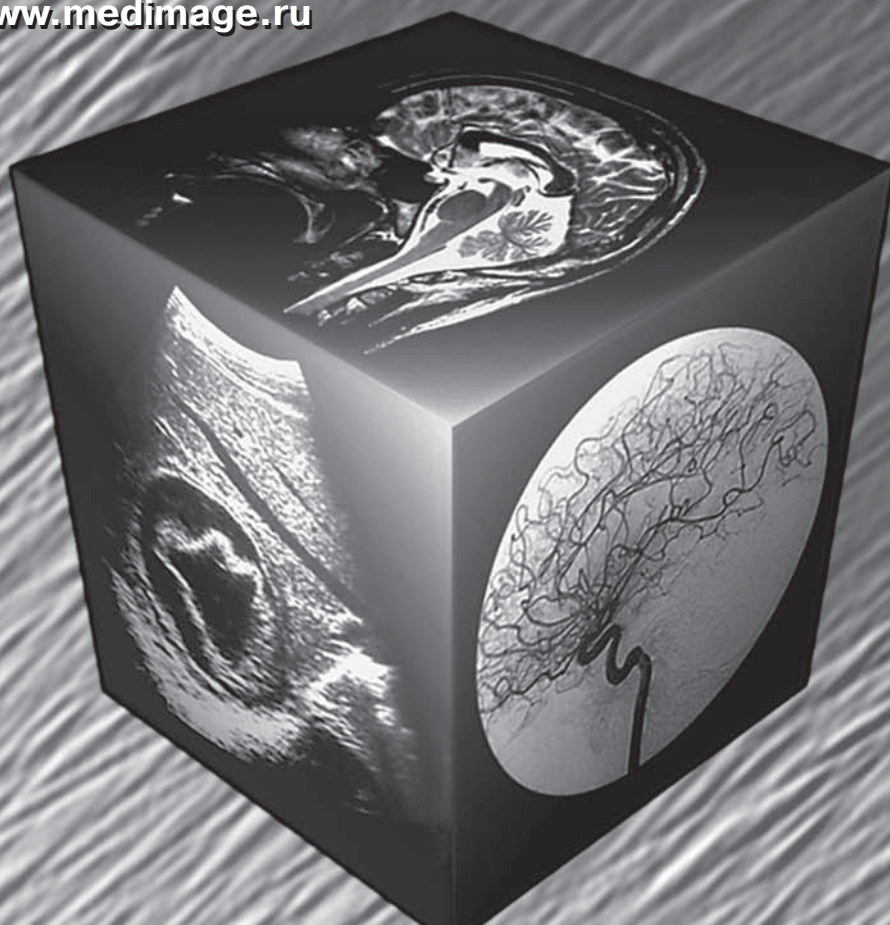
# МЕДИЦИНСКАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ

Medical Visualization

**Том 29 №1**  
**Vol 29 N1**

**2025**

[www.vidar.ru](http://www.vidar.ru)  
[www.medvis.vidar.ru](http://www.medvis.vidar.ru)  
[www.medimage.ru](http://www.medimage.ru)



**ВИДАР-М**

- Биомаркеры МРТ-перфузии при ишемии головного мозга у ликвидаторов аварии Чернобыльской АЭС
- Объемная КТ-перфузия печени при портальной гипертензии
- SWDS – новый параметр УЗ-диагностики воспалительных изменений в печени
- Выявление метастазов в печени с использованием Т1ВИ с КУ с эффектом переноса намагниченности
- Эластография почек у здоровых пациентов
- Блок идентификации кальцинатов в системе компьютерного анализа маммограмм
- Модель нейронной сети для выявления стенозов позвоночника на МР-томограммах

# МЕДИЦИНСКАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ



## Medical Visualization

## Medicsinskaya vizualizatsiya

**2025 Том 29 №1****Научно-практический журнал. Основан в 1997 г.****Выходит 4 раза в год****Официальный  
печатный орган****Российского общества рентгенологов и радиологов (129344, Москва, ул. Верхоянская, д. 18, корп. 2)  
Общества специалистов по лучевой диагностике (119435, Москва, ул. Большая Пироговская, д. 6)  
Московского регионального отделения Российского общества рентгенологов  
и радиологов (125040, Москва, ул. Расковой, д. 16/26, стр. 1)****Издатель****ООО “Видар-М” (109028, Москва, а/я 16 )**

### Главные редакторы

**Ревишвили Амиран Шотаевич** – академик РАН, доктор мед. наук, профессор, 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 рентгенологии” 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/0000000290149022>. 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](mailto: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 ФГАОУ 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 Казахстано-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** – канд. 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 рентгенодиагностики” Минздрава России, Москва, Российская Федерация. <https://orcid.org/0000000319409175>. Scopus Author ID: 7003497625

**Лукиниченко 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** – канд. 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** – доктор мед. наук, заведующий отделом лучевой диагностики ГБУЗ “Городская клиническая больница имени М.Е. Жадкевича Департамента здравоохранения города Москвы”, 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, Ученый секретарь 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, врач-рентгенолог ГБУЗ “Московский многопрофильный научно-клинический центр им. С.П. Боткина Департамента здравоохранения города Москвы”; 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

**Rienmüller 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 (Ревиевский Амиран Шотаевич)

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

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

ООО “Видар-М” 109028, Москва, а/я 16. Контакты: (495) 768-04-34, (495) 589-86-60, <http://www.vidar.ru>

Подписаться на наш журнал вы можете в любом отделении связи (каталог Роспечати, раздел “Здравоохранение. Медицина”), а также в издательстве ООО “Видар”

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

**Редактирование** Т.И. Луковская  
**Художники** О.А. Рыченкова, А.И. Морозова  
**Верстка** Ю.А. Кушель

“МЕДИЦИНСКАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ”

© ООО “Видар”, 2025.

Все права сохраняются.

Формат 60 × 90 1/8. Печ. л. 18. Тираж 1500 экз. Свободная цена.  
Отпечатано в типографии Onebook.ru (ООО “СамПолиграфист”), [www.onebook.ru](http://www.onebook.ru)  
Подписано в печать 1.03.2025 г.

# MEDICAL VISUALIZATION

## Медицинская визуализация

## Meditsinskaya vizualizatsiya

**2025 V. 29 N1**

**Quarterly Scientific and Practical Journal**  
**Est. 1997**

### Official press organ of the

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

**Society of specialists in X-ray diagnostics** (6, Bo'shaya Pirogovskaya str., 119435, 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 Vidar-M Ltd.** (p/b 16, 109028, Moscow, Russian Federation)

### Editors-in-Chief

**Amiran Sh. Revishvili** – Academician of the Russian Academy of Science, Dr. of Sci. (Med.), Professor, Director 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** – Cand. 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** – Cand. 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 Radiology department Zhadkevich City Clinical Hospital, 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. Sinityn** – 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.), Academic Secretary 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, radiologist, Botkin City Clinical Hospital (Moscow, Russian Federation); 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 Rienmüller** – 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 (VAK) 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](mailto:nudnov@rncrr.ru) Phone: +7-495-334-29-60 (Nikolay V. Nudnov)

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

Vidar Ltd. p/b 16, 109028, Moscow, Russian Federation Phone: +7-495-768-04-34, +7-495-589-86-60, <http://www.vidar.ru>

You can subscribe to the journal at any post office (Rospechat catalogue, section “Public Health. Medicine”) and in the publishing house “Vidar-M” Ltd.

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

**Editing** T.I. Lukovskaya  
**Designer** O.A. Rychenkova, A.I. Morosova  
**Prepress** Yu.A. Kushel  
“MEDICAL VISUALIZATION”  
© Vidar Ltd., 2024  
All rights reserved

Format 60 × 90 1/8. 18 printer's sheet. Circulation: 1500 ex. Free price.  
Printed at Onebook.ru (OOO “SamPoligrafist”), [www.onebook.ru](http://www.onebook.ru)  
Signed for printing: 1.03.2025



# Содержание

## Голова

- 11 Сопоставимость нейровизуализационных биомаркеров МРТ-перфузии с данными нейropsychологического тестирования при хронической ишемии головного мозга у ликвидаторов последствий аварии на Чернобыльской АЭС**  
Сергеев Н.И., Куликова Т.А., Нуднов Н.В., Солодкий В.А.
- 24 Снижение миелинизации белого вещества у пациентов с аффективными расстройствами по данным быстрого картирования макромолекулярной протонной фракции**  
Бородин С.О., Буренкова М.Г., Бородин О.Ю., Смирнова Л.П., Епимахова Е.В., Ярных В.Л.

## Сосуды

- 33 Интегральная ультразвуковая шкала оценки ретробульбарного кровотока при сахарном диабете 1 типа в молодом возрасте**  
Фомина С.В., Самойлова Ю.Г., Завадовская В.Д., Кошмелева М.В., Качанов Д.А., Трифонова Е.И., Зоркальцев М.А., Юн В.Э.

## Брюшная полость и забрюшинное пространство

- 41 Крутизна дисперсии скорости сдвиговых волн (SWDS) – новый параметр ультразвуковой диагностики воспалительных изменений в печени**  
Зыкин Б.И., Ионова Е.А., Аносова Т.А.
- 51 Объемная КТ-перфузия печени при портальной гипертензии: диагностический потенциал и клиническое значение**  
Джураева Н.М., Вахидова Н.Т., Амирхамзаев А.Т., Абдухалимова Х.В., Султанов А.Т., Хурсанова Д.Х., Миртаджиева З.Д., Магзумова С.Х.
- 62 Исследование диагностической эффективности выявления метастазов в печени с использованием T1-взвешенного контрастного исследования с эффектом переноса намагниченности**  
Санников М.Ю., Бородин О.Ю.

## Почки

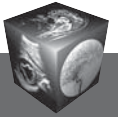
- 71 Возможность определения процентного отношения вклада почек в экскреторную функцию. Предварительные результаты**  
Громов А.И., Доморовская Я.С., Сивков А.В., Просянкин М.Ю., Войтко Д.А., Каприн А.Д., Алексеев Б.Я., Аполихин О.И.
- 80 Эластография паренхимы почек у здоровых пациентов (обзор литературы)**  
Маджугин М.Л., Болоцков А.С., Фирсов М.С., Дадаян А.Р.

## Молочная железа

- 92 Эффективность включения в состав системы компьютерного анализа маммограмм блока идентификации и дифференцирования кальцинатов: результаты одноцентрового проспективного рандомизированного исследования**  
Пасынков Д.В., Романычева Е.А., Егосин И.А., Колчев А.А., Меринов С.Н., Бусыгина О.В.

## Технологии лучевой диагностики

- 102 Модель нейронной сети для выявления и классификации стенозов пояснично-крестцового отдела позвоночника на МР-томограммах**  
Русаков А.С., Тумко В.В., Сарбаев Р.С., Успенская Н.А., Нуднов Н.В., Кармазановский Г.Г., Коробов А.В., Титова Л.А., Скачков А.А., Кульнева Т.В., Измалков Д.В., Андриенко Е.А., Иванников М.Е.



# Contents

## Head

- 11 Comparability of MRI perfusion neuroimaging biomarkers with neuropsychological testing data in chronic cerebral ischemia in Chernobyl disaster liquidators**

Nikolay I. Sergeev, Tatyana A. Kulikova,  
Nikolay V. Nudnov, Vladimir A. Solodkiy

- 24 Reduced myelination of white matter in patients with affective disorders according to fast macromolecular proton fraction mapping**

Sofia O. Borodina, Maria G. Burenkova,  
Oleg Yu. Borodin, Lyudmila P. Smirnova,  
Elena V. Epimakhova, Vasily L. Yarnykh

## Vessels

- 33 Integral ultrasound scale for assessing retrobulbar blood flow in type 1 diabetes mellitus at a young age**

Svetlana V. Fomina, Iuliia G. Samoilova,  
Vera D. Zavadovskaya, Marina V. Koshmeleva,  
Dmitriy A. Kachanov, Ekaterina I. Trifonova,  
Maxim A. Zorkaltsev, Vera E. Yun

## Abdomen and retroperitoneum

- 41 Shear-Wave Dispersion Slope (SWDS) is a new ultrasound parameter to detect liver inflammation**

Zykin B.I., Ionova E.A., Anosova T.A.

- 51 Role of volumetric CT perfusion of the liver in portal hypertension considering the level of portal circulation blocking: a prospective study**

Nigora M. Djuraeva, Nargiza T. Vakhidova,  
Aibek T. Amirkhamzaev, Khanum V. Abdukhalimova,  
Alisher T. Sultanov, Dilmura Kh. Khursanova,  
Zilola D. Mirtadzhieva, Saodat Kh. Magzumova

- 62 Study of diagnostic efficacy in detecting liver metastases using T1-weighted contrast-enhanced studies with magnetization transfer contrast effect**

Sannikov M.Yu., Borodin O.Yu.

## Kidneys

- 71 The ability to determine the percentage of kidney contribution to excretory function. Preliminary results**

Alexander I. Gromov, Yana S. Domorovskaya,  
Andrey V. Sivkov, Mikhail Yu. Prosyannikov,  
Dmitry A. Voitko, Andrey D. Kaprin,  
Boris Ya. Alekseev, Oleg I. Apolikhin

- 80 Elastography of renal parenchyma in healthy patients (literature review)**

Mikhail L. Madzhugin, Alexander S. Bolotskov,  
Maxim S. Firsov, Arsen R. Dadayan

## Breast

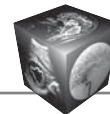
- 92 Effectiveness of the calcification identification and discrimination module incorporated into the computer aided detection system for mammography: the results of the single-center, prospective, randomised study**

Dmitry V. Pasynkov, Ekaterina A. Romanycheva,  
Ivan A. Egoshin, Alexey A. Kolchev,  
Sergey N. Merinov, Olga V. Busygina

## Radiological technologies

- 102 A neural network model for detection and classification of central lumbar spinal stenosis on MRI scans**

Andrey S. Rusakov, Vladislav V. Tumko,  
Ruslan S. Sarbaev, Natalia A. Uspenskaya,  
Nikolay V. Nudnov, Grigory G. Karmazanovsky,  
Andrey V. Korobov, Lilia A. Titova, Artur A. Skachkov,  
Taisiya V. Kulneva, Dmitry V. Izmalkov,  
Elizaveta A. Andrienko, Mikhail E. Ivannikov



ISSN 1607-0763 (Print); ISSN 2408-9516 (Online)  
<https://doi.org/10.24835/1607-0763-1513>

# Сопоставимость нейровизуализационных биомаркеров МРТ-перфузии с данными нейропсихологического тестирования при хронической ишемии головного мозга у ликвидаторов последствий аварии на Чернобыльской АЭС

© Сергеев Н.И.<sup>1,2</sup>, Куликова Т.А.<sup>1\*</sup>, Нуднов Н.В.<sup>1</sup>, Солодкий В.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГБУ «Российский научный центр рентгенорадиологии» Минздрава России; 117997 Москва, ул. Профсоюзная, д. 86, Российская Федерация

<sup>2</sup> ФГАОУ ВО РНИМУ им. Н.И. Пирогова Минздрава России; 117997 Москва, ул. Островитянова, д. 1, Российская Федерация

Одним из перспективных нейровизуализационных методов исследования при цереброваскулярной болезни является МРТ-перфузия головного мозга. Представляет интерес сопоставление выявленных изменений микроциркуляции с результатами нейропсихологического тестирования у лиц с хронической ишемией головного мозга, в том числе у пациентов, подвергшихся техногенному радиационному облучению.

**Цель исследования:** изучить взаимосвязь между изменениями показателей МРТ-перфузии с результатами нейропсихологического тестирования у ликвидаторов последствий аварии на Чернобыльской АЭС.

**Материал и методы.** Обследовано 165 пациентов в возрасте от 55 до 87 лет с диагнозом: хроническая цереброваскулярная болезнь. Основная группа – 97 ликвидаторов последствий аварии на Чернобыльской АЭС (ЛПА), контрольная группа – 68 пациентов, не подвергавшихся радиационному воздействию. Оценивались перфузионные изменения (CBV и CBF) в сером и белом веществе правой лобной доли (ROI-1, ROI-2) и аналогично в левом полушарии (ROI-4, ROI-5). В дальнейшем полученные перфузионные данные сопоставлялись с результатами нейропсихологического тестирования.

**Результаты.** При сравнении показателей МРТ-перфузии (CBV в мл/100 г и CBF в мл/100 г/мин) было установлено статистически значимое снижение указанных параметров в ROI-1 (CBV,  $p = 0,010$ ; CBF,  $p = 0,011$ ) и ROI-4 (CBV,  $p = 0,009$ ; CBF,  $p = 0,001$ ) преимущественно в основной группе. Анализ результатов нейропсихологического тестирования выявил статистически значимое снижение показателей MMSE и MoCA в основной группе по сравнению с контрольной группой. Кроме того, результаты HADS продемонстрировали значимое увеличение значений в основной группе как в разделе тревоги ( $p = 0,024$ ), так и в разделе депрессии ( $p = 0,027$ ) по отношению к показателям лиц контрольной группы. Корреляционный анализ между CBV и CBF в ROI-1, ROI-2, ROI-3, ROI-4 и ROI-5 в соответствии с анатомическими ориентирами головного мозга на уровне передних рогов боковых желудочков по данным МРТ-перфузии и результатам нейропсихологического тестирования выявил статистически значимые прямые корреляционные связи между CBF/CBV в ROI-1/ROI-4 и MMSE, MoCA и HADS.

**Заключение.** Выявлены более выраженные нарушения показателей перфузии головного мозга у ЛПА по сравнению с контрольной группой, а корреляционный анализ между CBV/CBF и результатами нейропсихологического тестирования установил прямую зависимость клинических проявлений психопатологического синдрома, выражающегося в снижении когнитивных функций с тяжестью нейроваскулярного дефицита у пациентов основной группы, имеющих системную эндотелиальную дисфункцию в связи с техногенным облучением всего тела в отдаленном периоде. Полученные данные демонстрируют и подтверждают эффективность контрастной T2\*-перфузии и могут использоваться в качестве нейровизуализационных биомаркеров у лиц с цереброваскулярной болезнью.

**Ключевые слова:** цереброваскулярная болезнь; МРТ-перфузия; ликвидаторы последствий аварии на ЧАЭС; головной мозг

**Авторы подтверждают отсутствие конфликтов интересов.**



**Для цитирования:** Сергеев Н.И., Куликова Т.А., Нуднов Н.В., Солодкий В.А. Сопоставимость нейровизуализационных биомаркеров МРТ-перфузии с данными нейропсихологического тестирования при хронической ишемии головного мозга у ликвидаторов последствий аварии на Чернобыльской АЭС. *Медицинская визуализация*. 2025; 29 (1): 11–23. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1513>

**Поступила в редакцию:** 15.11.2024. **Принята к печати:** 18.12.2024. **Опубликована online:** 14.02.2025.

# Comparability of MRI perfusion neuroimaging biomarkers with neuropsychological testing data in chronic cerebral ischemia in Chernobyl disaster liquidators

© Nikolay I. Sergeev<sup>1,2</sup>, Tatyana A. Kulikova<sup>1\*</sup>, Nikolay V. Nudnov<sup>1</sup>, Vladimir A. Solodkiy<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Russian Scientific Center of Roentgenoradiology of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation; 86, Profsoyusnaya str., Moscow 117997, Russian Federation

<sup>2</sup> Pirogov Russian National Research Medical University; 1, Ostriviyanova str., Moscow 117997, Russian Federation

**Summary.** One of the promising neuroimaging methods for studying the brain in cerebrovascular disease is MRI perfusion of the brain. It is of interest to compare the revealed data with the results of specialized neuropsychological testing in individuals with chronic cerebral ischemia, including patients from the risk group – exposed to radiation.

**Objective of the study.** 165 patients aged 55 to 87 years diagnosed with chronic cerebrovascular disease were examined. The main group included 97 liquidators of the Chernobyl accident (LPA), the control group included 68 patients who were not exposed to radiation. Perfusion changes (CBV and CBF) in the gray and white matter of the right frontal lobe (ROI-1, ROI-2) and similarly in the left hemisphere (ROI-4, ROI-5) were assessed. The obtained perfusion data were then compared with the results of neuropsychological testing. Results. Comparing the MRI perfusion parameters (CBV in ml/100 g and CBF in ml/100 g/min), a statistically significant decrease in the specified parameters was found in ROI-1 (CBV,  $p = 0.010$ ; CBF,  $p = 0.011$ ) and ROI-4 (CBV,  $p = 0.009$ ; CBF,  $p = 0.001$ ), mainly in the main group. Analysis of the neuropsychological testing results revealed a statistically significant ( $p = 0.005$ ) decrease in MMSE and MoCA in the main group compared to the control group. In addition, the HADS results demonstrated a significant increase in values in the main group, both in the anxiety section ( $p = 0.024$ ) and in the depression section ( $p = 0.027$ ) in relation to the control group. Correlation analysis between CBV and CBF in ROI-1, ROI-2, ROI-3, ROI-4 and ROI-5 in accordance with the anatomical landmarks of the brain at the level of the lateral ventricles according to MRI perfusion data and the results of neuropsychological testing revealed statistically significant direct correlations between CBF/CBV in ROI-1/ROI-4 and MMSE, MoCA and HADS.

**Conclusions.** MRI perfusion revealed more pronounced disturbances in perfusion parameters in LPA compared to the control group, and correlation analysis between CBV/CBF and the results of neuropsychological testing established a direct relationship between the clinical manifestations of the psychopathological syndrome, expressed in a decrease in cognitive functions with the severity of neurovascular deficit in patients of the main group with systemic endothelial dysfunction due to man-made irradiation of the whole body in the late period. The obtained data demonstrate and confirm the effectiveness of contrast T2\*-perfusion and can be used as neuroimaging biomarkers in individuals with cerebrovascular disease.

**Keywords:** cerebrovascular disease; MRI-perfusion; Chernobyl accident liquidators; brain

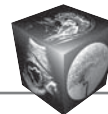
**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest. The study had no sponsorship.

**For citation:** Sergeev N.I., Kulikova T.A., Nudnov N.V., Solodkiy V.A. Comparability of MRI perfusion neuroimaging biomarkers with neuropsychological testing data in chronic cerebral ischemia in Chernobyl disaster liquidators. *Medical Visualization*. 2025; 29 (1): 11–23. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1513>

**Received:** 15.11.2024.

**Accepted for publication:** 18.12.2024.

**Published online:** 14.02.2025.



## Введение

Лежащие в основе цереброваскулярной болезни сосудистые когнитивные нарушения, связанные с острым и/или хроническим нарушением мозгового кровообращения, существенным образом влияют на бытовую, социальную и профессиональную деятельность пациентов, приводя к снижению качества жизни, а в ряде случаев к инвалидизации и развитию полной зависимости от окружающих [1, 2]. В Российской Федерации за 2000 г. число новых выявленных случаев данной патологии составило 2483, в 2019 г. уже 5136 случаев [3]. Цереброваскулярные нарушения с психопатологической симптоматикой выявлялись у 65–80% ликвидаторов последствий аварии на Чернобыльской АЭС (ЛПА) начиная с 1992–1994 гг. [4, 5]. Эти сведения согласуются с данными Российского межведомственного экспертного совета по установлению причинно-следственной связи заболеваний, инвалидности и смерти лиц, подвергшихся радиационному воздействию в результате аварий и катастроф на радиационно опасных объектах [6]. Сложности в дифференциальной диагностике хронической ишемии головного мозга обусловлены большим спектром заболеваний, схожих по клиническим проявлениям, что определяет необходимость в совершенствовании диагностических подходов. Одним из перспективных нейровизуализационных методов обследования является МРТ-перфузия головного мозга, что подтверждается многочисленными работами [7–9].

В литературе мало сведений об эпидемиологии и особенностях дифференциальной диагностики ишемических изменений головного мозга у лиц, подвергшихся радиационному облучению [10]. В частности, у ЛПА характер течения цереброваскулярной патологии отличается более ранним и быстро прогрессирующим течением в отдаленном периоде после техногенного радиационного воздействия вследствие развития системной эндотелиальной дисфункции. Это приводит к раннему формированию психопатологического синдрома с выраженными аффективными расстройствами [11]. Соматическая патология сочетается со стойкими невротическими нарушениями в виде астенодепрессивных, астеноневротических, тревожно-фобических и ипохондрических синдромов. Психопатологические проявления обнаруживают тенденцию к прогрессивности и снижению когнитивных функций вследствие нарастающей ишемии мозга [12, 13]. Крайне мало исследований, посвященных углубленному исследованию параметров перфузии головного мозга у данной когорты пациентов [14, 15]. В связи с этим очевид-

на необходимость изучения особенностей течения хронической невроваскулярной недостаточности у ЛПА в отдаленном периоде с целью определения выраженности сосудистых изменений и когнитивных расстройств для выбора этиопатогенетической терапии.

**Цель исследования:** поиск корреляционной зависимости между результатами нейропсихологического тестирования и показателями перфузии головного мозга у участников ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС в отдаленном периоде.

## Материал и методы

В исследование было включено 165 пациентов мужского пола, страдающих хронической ишемией головного мозга (цереброваскулярная болезнь), диагноз которым был поставлен на основании данных анамнеза, клинико-лабораторных данных и результатов инструментальных методов обследования.

Пациенты были разделены на 2 группы. Основную, 1-ю, группу составили 97 ЛПА с 1986 по 1990 г. Полученная доза внешнего облучения составляла от 0,15 до 0,25 Гр.

В контрольную, 2-ю, группу вошло 68 пациентов с указанным диагнозом, не подвергавшихся радиационному воздействию. Средний возраст всех участников исследования составил  $69,8 \pm 0,8$  года.

Данные группы были сформированы на основании разработанных нами критериев включения и исключения. В исследование не допускались лица, имеющие хронические болезни в стадии декомпенсации, новообразования головного мозга, острые нарушения мозгового кровообращения, черепно-мозговые травмы, хроническую сердечно-сосудистую недостаточность, соматические и инфекционные заболевания с энцефалопатией.

В работу были включены 3 нейропсихологических теста, рекомендованных клиническими рекомендациями “Когнитивные расстройства у лиц пожилого и старческого возраста” за 2020 г. [16]:

– **краткая шкала оценки психического статуса** (Mini Mental State Examination – MMSE). Эта шкала позволяет оценивать различные когнитивные функции (ориентировку во времени, месте, восприятие, концентрацию внимания, память, речевые функции). Максимальный балл по шкале составляет 30;

– **монреальская шкала оценки когнитивных функций** (The Montreal Cognitive Assessment – MoCA-test). Шкала была разработана как средство быстрой оценки нейропсихологического статуса при умеренных когнитивных расстройствах (УКР).



Она позволяет оценить различные когнитивные сферы (внимание и концентрацию, управляющие функции, память, язык, зрительно-конструктивные навыки, абстрактное мышление, счет и ориентацию). Максимально возможное количество баллов 30;

– **госпитальная шкала тревоги и депрессии** (Hospital Anxiety and Depression Scale – HADS). Шкала составлена из 14 утверждений, содержащих 2 основных критерия: “тревога” и “депрессия”. Опросник отражает градации выраженности признака и кодируется по нарастанию тяжести симптома от 0 (отсутствие) до 3 (максимальная выраженность). Преимущество HADS заключается в ее лаконичности и универсальности, что делает ее приоритетной для первичной оценки тревожных и депрессивных состояний в клинической практике. Максимальная сумма баллов по каждой подшкале составляет 21.

Отражая различные домены когнитивной сферы, дополняя друг друга, все три шкалы использовались в нашем госпитальном нейропсихологическом исследовании и детализировали особенности поражения высших мозговых функций с более выраженным дефицитом одних когнитивных сфер и относительной сохранностью других.

Протокол MPT головного мозга включал в себя 4 этапа в соответствии с поставленными задачами:

– **Структурная MPT:** T2ВИ-AX+SAG, FLAIR AX+COR, T1-AX, T2\*\_hemo-ax, DWI. Указанные последовательности позволяли оценить хронические структурные изменения, а также исключить объемные образования.

– **Визуализация сосудистого русла:** 3D-TOF-ангиография сосудов виллизиева круга и 3D-венография венозных синусов. Выполнялась для исключения острых обструктивных сосудистых нарушений (рис. 1).

– **Перфузионная часть:** выполнялась контрастная DSC-T2\*-перфузия с автоматическим расчетом показателей церебрального объема крови (CBV, cerebral blood volume), церебрального кровотока (CBF, cerebral blood flow), скорости прохождения крови (MTT, mean transit time). Показатели измерялись в белом и сером веществе лобных долей обоих полушарий (рис. 2).

– **Контрастное усиление:** заканчивался протокол выполнением 3D-T1 + C AX для исключения новообразований головного мозга, скрытых сосудистых аномалий.

Режим перфузии на рабочем столе VIDAR VIEWER (с) совмещался с режимом FLAIR с помощью синхронизированного 3D-маркера. Это позволяло нивелировать невысокое пространственное разрешение перфузионных карт и проводить

более точный выбор зон интереса для размещения инструмента ROI (region of interest, зона интереса). У каждого пациента измерялось 5 зон интереса: ROI-1 и ROI-2 для коры и глии лобной доли правого полушария, а ROI-4, ROI-5 аналогично для левого полушария. ROI-3 использовалась в качестве референсной точки наибольших значений кровотока и выставлялась на область, близкую к слиянию венозных синусов (сагиттальный и поперечные). Нечеткая визуализация артерий виллизиева круга ввиду относительно малых диаметров сосудов более чем в половине случаев не позволяла достоверно выставить ROI-артерия, ввиду чего данный критерий не использовался (см. рис. 2).

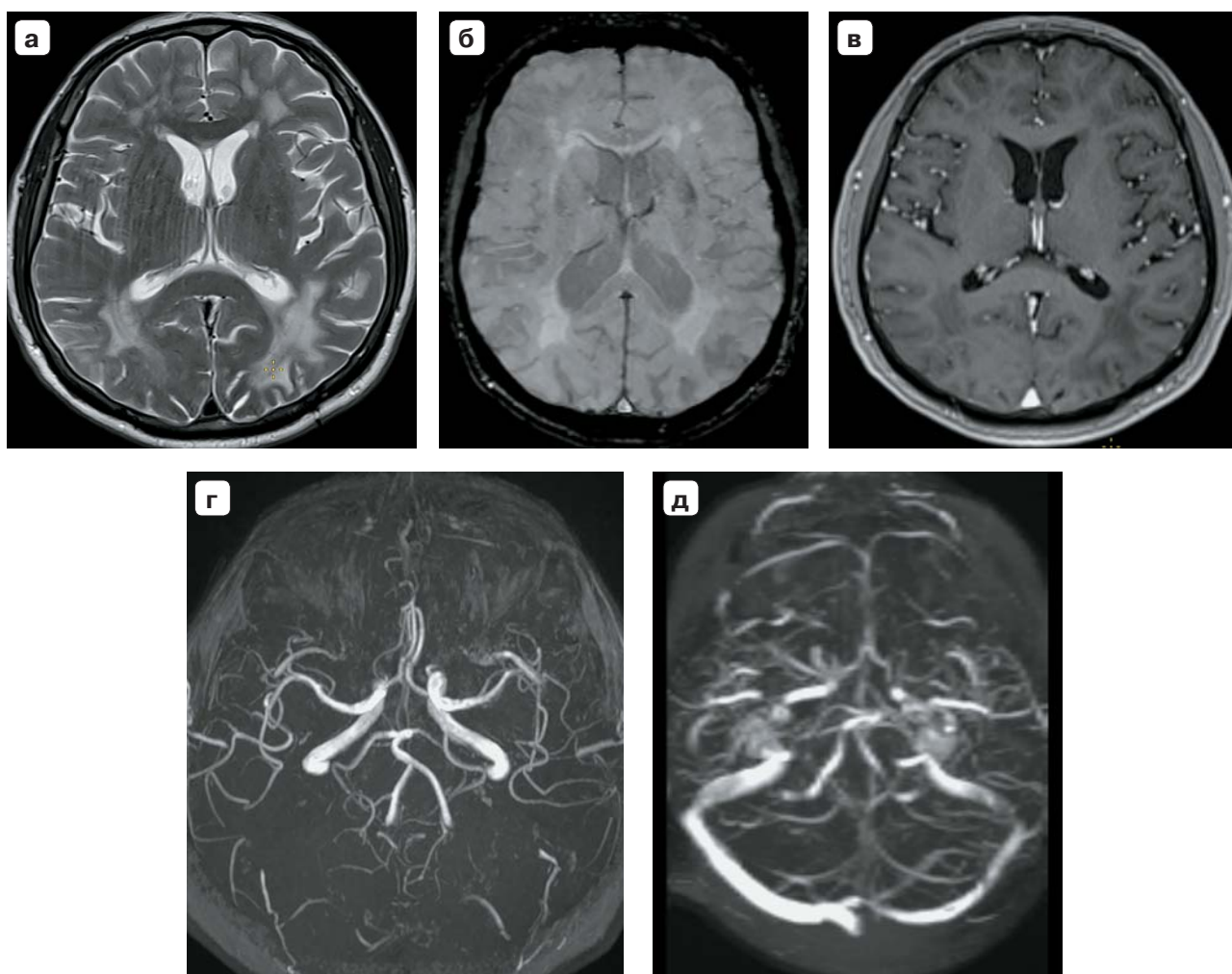
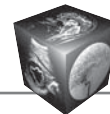
Все пациенты подписывали добровольное информированное согласие на прохождение нейропсихологического тестирования и контрастного MPT-исследования на базе ФГБУ РНЦПР Минздрава России, согласия этического комитета для прохождения данного обследования не требовалось.

Статистическая обработка полученных данных выполнялась с использованием электронной таблицы Microsoft Excel и программного обеспечения SPSS для Windows, версия 26.0 (S), Statistica, версия 13.

При сравнении частот встречаемости признаков двух независимых групп использовался точный критерий Фишера или критерий  $\chi^2$  с поправкой на правдоподобие в зависимости от количества сопряженных признаков. Для сравнения количественных данных применялся U-критерий Манна–Уитни.

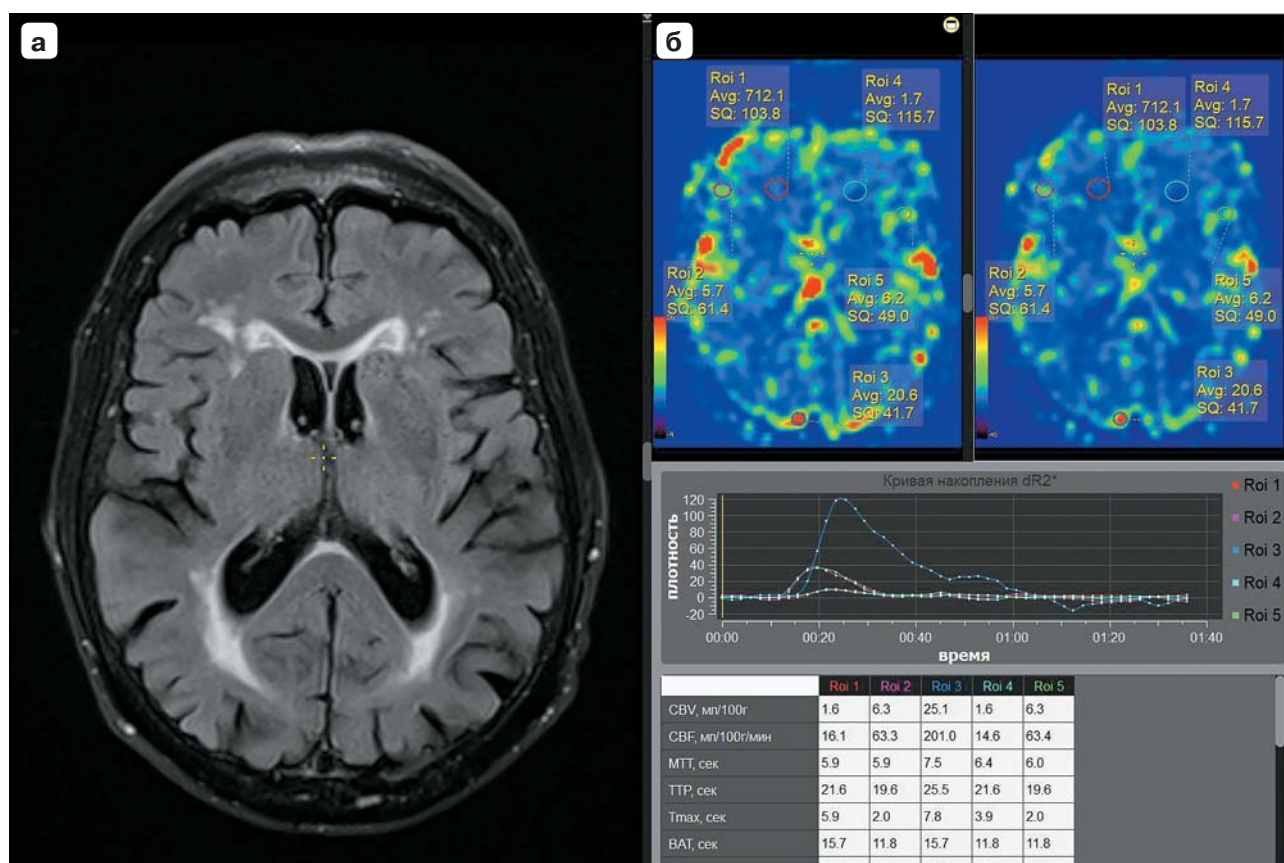
Для проверки на нормальность распределения с целью последующего определения возможности применения параметрических или непараметрических критериев при сравнении групп использовался критерий Шапиро–Уилка и критерий Колмогорова–Смирнова. Данные нашего исследования характеризуются ненормальным распределением, поэтому представлены медианой, верхним и нижним квартилями (Me [Q25%;Q75%]).

Для определения взаимосвязи между результатами нейропсихологического тестирования и данными, полученными во время проведения MPT-перфузии, применялся корреляционный анализ. Статистически значимой корреляционной связью считалось наличие  $p > 0,05$ . Критерием оценки связи является коэффициент корреляции  $r_{xy}$  Пирсона. Положительное значение взаимосвязи считалось прямым, отрицательное – обратным. Степень тесноты определялась по шкале Чеддока, умеренное значение корреляции (от 0,3 до 0,5), что было приемлемо для подтверждения взаимосвязи признаков.



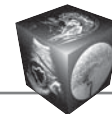
**Рис. 1.** Пациент П., 1942 года рождения, основная группа. МРТ головного мозга: **а** – в режиме T2ВИ, множественные сливающиеся очаги глиоза в обоих полушариях; **б** – в режиме T2\*\_hemo, данных о наличии гематомы нет; **в** – в режиме T1 с контрастным усилением, данных о наличии новообразования нет; **г** – в режиме бесконтрастной ангиографии; **д** – в режиме венографии – данных о наличии обструктивных изменений нет.

**Fig. 1.** Patient P., born in 1942, main group. MRI of the brain in the following modes: **a** – T2VI, multiple merging foci of gliosis in both hemispheres; **б** – T2\*\_hemo, no data for hematoma; **в** – T1 with contrast enhancement, no data for neoplasms; **г** – in the mode of non-contrast angiography; **д** – venography, – no data for obstructive changes.



**Рис. 2.** Тот же пациент. МРТ головного мозга: **а** – в режиме FLAIR определяются множественные сливающиеся перивентрикулярные очаги и зоны глиоза в обоих полушариях; **б** – в режиме перфузии выделено 5 зон интереса, значения CBV, CBF, MTT отражены в таблице, отражены на графике.

**Fig. 2.** The same patient. MRI of the brain in the modes. **а** – FLAIR, multiple merging periventricular foci and gliosis zones in both hemispheres are determined; **б** – perfusion mode, 5 zones of interest are highlighted, the values of CBV, CBF, MTT are shown in the table, shown on the graph.



## Собственные результаты исследования

По данным структурной МРТ у пациентов обеих групп исследования были выявлены признаки глиозных изменений (Fazekas 0–3 степени) и атрофии (0–3 степени) различной степени выраженности. Эти данные были проанализированы и изложены в предыдущих работах [17].

### Оценка состояния мозгового кровотока методом МРТ-перфузии

В ходе работы мы получили параметры скорости и объема мозгового кровотока (CBV и CBF) по данным МРТ-перфузии в ROI-1, ROI-2, ROI-3, ROI-4 и ROI-5 в обеих исследуемых группах, что позволило с высокой точностью определить отличительные особенности, характерные для ЛПА. При анализе полученных результатов МРТ-перфузии было зарегистрировано следующее: в ROI-1 (белое вещество правой лобной доли в области переднего рога правого бокового желудочка) продемонстрировано статистически значимое уменьшение CBV (1,65 [1,3; 2,5],  $p = 0,010$ ) и CBF (12,6 [8,2; 21,8],  $p = 0,011$ ) у пациентов основной группы (рис. 3а) по сравнению с контрольной группой (CBV 2,2 [1,7; 3,3], CBF 18,5 [12,6; 26,2]); в ROI-2 (серое вещество правой лобной доли) не было выявлено статистически значимого различия между группами (CBV  $p = 0,064$ , CBF  $p = 0,057$ ), но приближалось к значимому уровню (рис. 3б). Так, показатели перфузии в основной группе (CBV 7,15 [5,8; 9,8], CBF 55,9 [36,9; 76,0]) имели более низкие значения по сравнению с показателями перфузии контрольной группы (CBV 7,8 [7,0; 13,2], CBF 62,4 [51,5; 80,4]); в ROI-3 (зоны слияния поперечных и сагиттального венозных синусов) также не было зафиксировано статистически значимого различия между группами (CBV,  $p = 0,091$ , CBF,  $p = 0,079$ ). Однако при рассмотрении данных было установлено, что CBV (17,2 [7,3; 27,4] и CBF (159,2 [98,5; 211,6]) в основной группе отличались более низкими значениями по сравнению с показателями контрольной группы (CBV 20,9 [14,3; 28,8], CBF 192,2 [136,4; 241,3]) (рис. 3, 1-я группа – основная; 2-я группа – контрольная).

Следует отметить, что при рассмотрении результатов МРТ-перфузии в ROI-4 (белое вещество левой лобной доли в области переднего рога левого бокового желудочка) было выявлено статистически значимое уменьшение в основной группе (рис. 3г) CBV (1,9 [1,3; 2,3],  $p = 0,009$ ) и CBF (11,8 [7,7; 20,4],  $p = 0,001$ ) по сравнению с контрольной группой (CBV 2,3 [1,7; 3,1], CBF 19,0 [13,0;

25,4]). При этом в ROI-5 (серое вещество левой лобной доли) статистически значимого различия между группами (CBV  $p = 0,076$ , CBF  $p = 0,084$ ) не было зафиксировано, но CBV (7,85 [5,9; 10,4]) и CBF (60,3 [39,0; 75,65]) в основной группе имели более низкие значения по сравнению с показателями контрольной группы – CBV 8,85 [7,25; 14,4], CBF 68,6 [51,85; 91,05]).

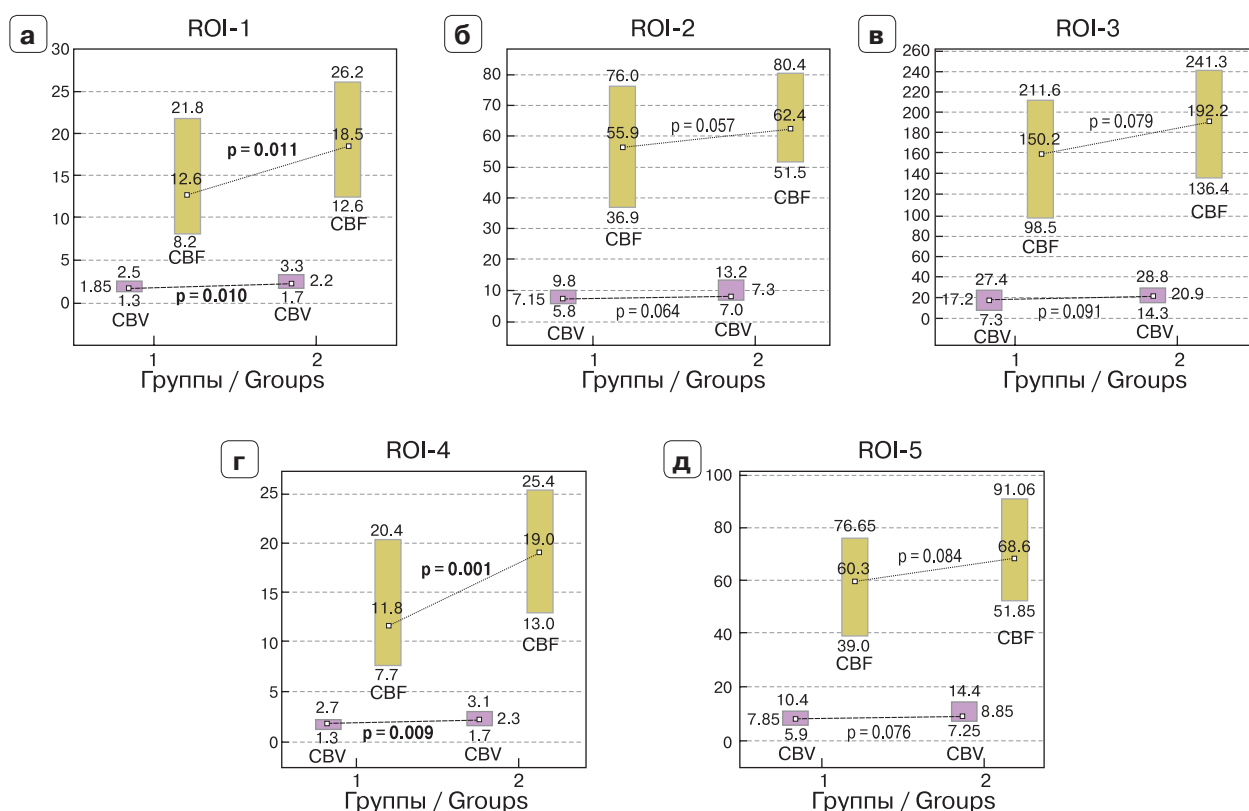
### Результаты нейропсихологического тестирования

Всем пациентам было проведено нейропсихологическое тестирование. При анализе показателей MMSE выявлено статистически значимое снижение результатов ( $p = 0,0001$ ) у пациентов основной группы (18,0 [15,0; 19,0]) по отношению к лицам контрольной группы (22,0 [21,0; 24,0]). Также было отмечено статистически значимое снижение показателей ( $p = 0,0001$ ) MoCA у пациентов основной группы (19,0 [16,0; 20,0]) по отношению к контрольной группе (22,0 [20,0; 24,0]) (рис. 4, 1-я группа – основная, 2-я группа – контрольная).

Результаты тестирования госпитальной шкалы (HADS) продемонстрировали статистически значимое увеличение значений у пациентов основной группы как в разделе “тревога” (10,0 [9,0; 10,0],  $p = 0,024$ ), так и в разделе “депрессия” (9,5 [9,0; 10,0],  $p = 0,027$ ) по сравнению с контрольной группой 8,0 [7,0; 10,0] и 8,0 [7,0; 10,0] соответственно).

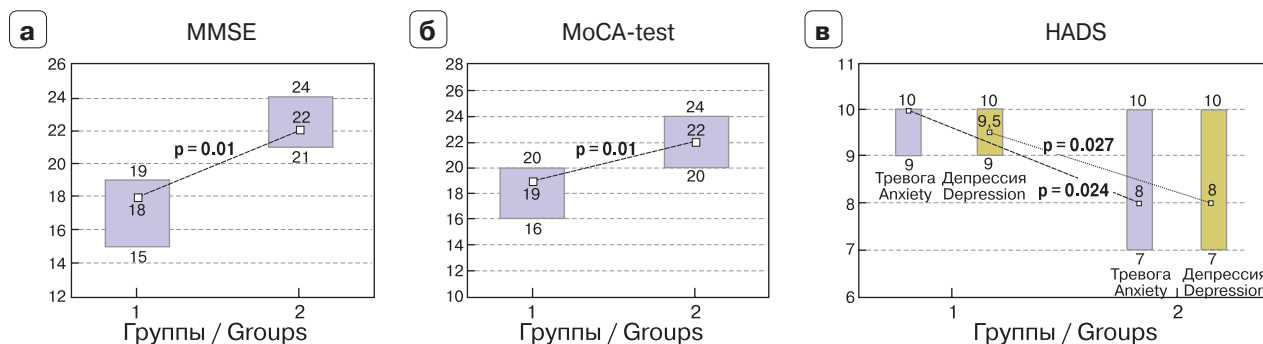
Результаты нейропсихологического тестирования демонстрируют признаки умеренного и/или выраженного дефицита когнитивных функций в одном или более когнитивных доменах у ЛПА по отношению к группе сравнения. Дефект когнитивных функций в основной группе пациентов был наиболее выражен со стороны скорости обработки информации, внимания и лобных управляющих функций, а также эмоциональных или личностных расстройств (депрессия, тревожно-аффективные расстройства).

В когнитивной сфере в наибольшей степени страдали управляющие функции (способность планировать и оценивать действия), внимание (способность удерживать внимание и переключать его) и мышление (способность к обобщению, абстрагированию, счету). В значительной мере страдали праксис (за счет неспособности спланировать свои действия), восприятие (как правило, отмечалась его фрагментарность за счет импульсивности, неспособности последовательно проанализировать весь массив предъявляемой информации), а также память.



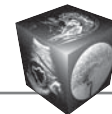
**Рис. 3.** Церебральный объем крови (мл/100 г) и церебральный кровоток мозговой ткани (мл/100 г/мин) в ROI-1, ROI-2, ROI-3, ROI-4 и ROI-5 в соответствии с анатомическими ориентирами головного мозга на уровне боковых желудочков. **а** – CBV и CBF мозговой ткани в ROI-1; **б** – CBV и CBF мозговой ткани в ROI-2; **в** – CBV и CBF мозговой ткани в ROI-3; **г** – CBV и CBF мозговой ткани в ROI-4; **д** – CBV и CBF мозговой ткани в ROI-5.

**Fig. 3.** Cerebral blood volume (ml/100 g) and cerebral blood flow of brain tissue (ml/100 g per minute) in ROI-1, ROI-2, ROI-3, ROI-4 and ROI-5 in accordance with the anatomical landmarks of the brain at the level of the lateral ventricles. **а** – CBV and CBF of brain tissue in ROI-1; **б** – CBV and CBF of brain tissue in ROI-2; **в** – CBV and CBF of brain tissue in ROI-3; **г** – CBV and CBF of brain tissue in ROI-4; **д** – CBV and CBF of brain tissue in ROI-5.



**Рис. 4.** Данные нейропсихологического тестирования: краткая шкала оценки психического статуса (MMSE), монреальская шкала оценки когнитивных функций (MoCA) и госпитальная шкала тревоги и депрессии (HADS). **а** – MMSE; **б** – MoCA; **в** – HADS. Результаты представлены в виде Me [Q25%;Q75%].

**Fig. 4.** Neuropsychological testing data: Mini Mental State Examination – MMSE, The Montreal Cognitive Assessment – MoCA-test and Hospital Anxiety and Depression Scale – HADS (Me [Q25%;Q75%]). **а** – MMSE; **б** – MoCA; **в** – HADS.



### Корреляционный анализ между CBV, CBF по данным MPT-перфузии и результатами нейропсихологического тестирования

При проведении корреляционного анализа были установлены статистически значимые прямые корреляционные связи между CBV в ROI-1 (белое вещество правой лобной доли в области переднего рога правого бокового желудочка) и MMSE ( $r_{xy} = 0,473$ ;  $p = 0,050$ ), MoCA ( $r_{xy} = 0,536$ ;  $p = 0,012$ ), HADS “тревога” ( $r_{xy} = 0,512$ ;  $p = 0,003$ ) и “депрессия” ( $r_{xy} = 0,398$ ;  $p = 0,046$ ). Все выявленные связи имели умеренную (0,3–0,5) либо заметную (0,5–0,7) тесноту по шкале Чеддока (табл. 1).

Также выявлена статистически значимая прямая корреляционная связь между CBV в ROI-4 (белое вещество левой лобной доли в области переднего рога левого бокового желудочка) и MMSE ( $r_{xy} = 0,461$ ;  $p = 0,013$ ), MoCA ( $r_{xy} = 0,537$ ;  $p = 0,009$ ), HADS “тревога” ( $r_{xy} = 0,423$ ;  $p = 0,041$ ) и “депрессия” ( $r_{xy} = 0,651$ ;  $p = 0,004$ ). Все выявленные связи имели умеренную (0,3–0,5) либо заметную (0,5–0,7) тесноту по шкале Чеддока.

Статистически значимые прямые корреляционные связи зарегистрированы между CBF в ROI-1 (белое вещество правой лобной доли в области переднего рога правого бокового желудочка) и MMSE ( $r_{xy} = 0,672$ ;  $p = 0,015$ ), MoCA ( $r_{xy} = 0,672$ ;  $p = 0,015$ ), HADS “тревога” ( $r_{xy} = 0,533$ ;  $p = 0,023$ ) и “депрессия” ( $r_{xy} = 0,325$ ;  $p = 0,004$ ). Все выявленные связи имели умеренную (0,3–0,5) либо заметную (0,5–0,7) тесноту по шкале Чеддока.

Кроме того, установлена статистически значимая прямая корреляционная связь между CBF в ROI-4 (белое вещество левой лобной доли в области переднего рога левого бокового желудочка) и MMSE ( $r_{xy} = 0,492$ ;  $p = 0,032$ ), MoCA ( $r_{xy} = 0,672$ ;  $p = 0,017$ ), HADS “тревога” ( $r_{xy} = 0,562$ ;  $p = 0,003$ ) и “депрессия” ( $r_{xy} = 0,473$ ;  $p = 0,029$ ). Все выявленные связи имели умеренную (0,3–0,5) либо заметную (0,5–0,7) тесноту по шкале Чеддока (табл. 2).

Результаты корреляционного анализа показывают значимую сопоставимость перфузионных изменений при хронической ишемии головного

**Таблица 1.** Результаты корреляционного анализа между церебральным объемом крови и церебральным кровотоком в ROI-1, ROI-2, ROI-3, ROI-4, ROI-5 в соответствии с анатомическими ориентирами головного мозга на уровне боковых желудочков по данным MPT-перфузии и результатами нейропсихологического тестирования

**Table 1.** Results of the correlation analysis between cerebral blood volume and cerebral blood flow in ROI-1, ROI-2, ROI-3, ROI-4, ROI-5 in accordance with the anatomical landmarks of the brain at the level of the lateral ventricles according to MRI perfusion data and the results of neuropsychological testing

| CBV<br>(церебральный объем<br>крови)/Тест<br>CBV (Cerebral Blood Volume)/<br>Test | Краткая шкала<br>оценки<br>психического<br>статуса (MMSE)<br>Mini Mental State<br>Examination –<br>MMSE | Монреальская<br>шкала оценки<br>когнитивных<br>функций (MoCA)<br>The Montreal<br>Cognitive<br>Assessment –<br>MoCA-test | Госпитальная<br>шкала (HADS)<br>тревоги<br>Hospital Anxiety<br>Scale – HADS | Госпитальная<br>шкала (HADS)<br>депрессии<br>Hospital<br>Depression<br>Scale – HADS |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| ROI-1                                                                             | $r_{xy} = 0.473$ ;<br>$p = 0.050^*$                                                                     | $r_{xy} = 0.536$ ;<br>$p = 0.012^*$                                                                                     | $r_{xy} = 0.512$ ;<br>$p = 0.003^*$                                         | $r_{xy} = 0.398$ ;<br>$p = 0.046^*$                                                 |
| ROI-2                                                                             | $r_{xy} = 0.107$ ;<br>$p = 0.122$                                                                       | $r_{xy} = 0.144$ ;<br>$p = 0.246$                                                                                       | $r_{xy} = 0.233$ ;<br>$p = 0.115$                                           | $r_{xy} = 0.303$ ;<br>$p = 0.542$                                                   |
| ROI-3                                                                             | $r_{xy} = 0.344$ ;<br>$p = 0.672$                                                                       | $r_{xy} = 0.127$ ;<br>$p = 0.872$                                                                                       | $r_{xy} = 0.249$ ;<br>$p = 0.215$                                           | $r_{xy} = 0.103$ ;<br>$p = 0.613$                                                   |
| ROI-4                                                                             | $r_{xy} = 0.461$ ;<br>$p = 0.013^*$                                                                     | $r_{xy} = 0.537$ ;<br>$p = 0.009^*$                                                                                     | $r_{xy} = 0.423$ ;<br>$p = 0.041^*$                                         | $r_{xy} = 0.651$ ;<br>$p = 0.004^*$                                                 |
| ROI-5                                                                             | $r_{xy} = 0.118$ ;<br>$p = 0.918$                                                                       | $r_{xy} = 0.225$ ;<br>$p = 0.316$                                                                                       | $r_{xy} = 0.112$ ;<br>$p = 0.618$                                           | $r_{xy} = 0.307$ ;<br>$p = 0.514$                                                   |

Примечание. Здесь и в табл. 2: \* – статистически значимые значения корреляции.

Note. Here and in table 2: \* – statistically significant correlation values.



**Таблица 2.** Результаты корреляционного анализа между церебральным кровотоком в ROI-1, ROI-2, ROI-3, ROI-4, ROI-5 в соответствии с анатомическими ориентирами головного мозга на уровне боковых желудочков по данным MPT-перфузии и результатами нейропсихологического тестирования

**Table 2.** Results of the correlation analysis between cerebral blood flow in ROI-1, ROI-2, ROI-3, ROI-4, ROI-5 in accordance with the anatomical landmarks of the brain at the level of the lateral ventricles according to MRI perfusion data and the results of neuropsychological testing

| CBV<br>(церебральный объем<br>крови)/Тест<br>CBV (Cerebral Blood Volume)/<br>Test | Краткая шкала<br>оценки<br>психического<br>статуса (MMSE)<br>Mini Mental State<br>Examination –<br>MMSE | Монреальская<br>шкала оценки<br>когнитивных<br>функций (MoCA)<br>The Montreal<br>Cognitive<br>Assessment –<br>MoCA-test | Госпитальная<br>шкала (HADS)<br>тревоги<br>Hospital Anxiety<br>Scale – HADS | Госпитальная<br>шкала (HADS)<br>депрессии<br>Hospital<br>Depression<br>Scale – HADS |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| ROI-1                                                                             | $r_{xy} = 0.672$ ;<br>$p = 0.015^*$                                                                     | $r_{xy} = 0.672$ ;<br>$p = 0.015^*$                                                                                     | $r_{xy} = 0.533$ ;<br>$p = 0.023^*$                                         | $r_{xy} = 0.325$ ;<br>$p = 0.004^*$                                                 |
| ROI-2                                                                             | $r_{xy} = 0.185$ ;<br>$p = 0.907$                                                                       | $r_{xy} = 0.231$ ;<br>$p = 0.557$                                                                                       | $r_{xy} = 0.163$ ;<br>$p = 0.683$                                           | $r_{xy} = 0.173$ ;<br>$p = 0.436$                                                   |
| ROI-3                                                                             | $r_{xy} = 0.288$ ;<br>$p = 0.739$                                                                       | $r_{xy} = 0.134$ ;<br>$p = 0.537$                                                                                       | $r_{xy} = 0.214$ ;<br>$p = 0.137$                                           | $r_{xy} = 0.146$ ;<br>$p = 0.239$                                                   |
| ROI-4                                                                             | $r_{xy} = 0.492$ ;<br>$p = 0.032^*$                                                                     | $r_{xy} = 0.672$ ;<br>$p = 0.017^*$                                                                                     | $r_{xy} = 0.562$ ;<br>$p = 0.003^*$                                         | $r_{xy} = 0.473$ ;<br>$p = 0.029^*$                                                 |
| ROI-5                                                                             | $r_{xy} = 0.234$ ;<br>$p = 0.863$                                                                       | $r_{xy} = 0.274$ ;<br>$p = 0.442$                                                                                       | $r_{xy} = 0.261$ ;<br>$p = 0.727$                                           | $r_{xy} = 0.109$ ;<br>$p = 0.377$                                                   |

мозга с показателями нейропсихологического тестирования, в особенности у пациентов основной группы, подвергшихся техногенному облучению.

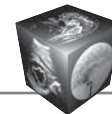
### Обсуждение

В отдаленном периоде ведущее место занимают когнитивные и эмоционально-волевые нарушения, которые являются определяющими в инвалидизации и социальной дезадаптации ЛПА [18, 19]. При этом в некоторых исследованиях отмечено, что когнитивные нарушения, которые являются одним из основных клинических проявлений энцефалопатии, зачастую с возрастом пациентов значимой корреляции не имеют [20]. Все больше данных указывает на то, что дисфункция сосудисто-нервного комплекса вносит решающий вклад в развитие хронической ишемии головного мозга и других нейродегенеративных заболеваний [21, 22]. Проведенные исследования демонстрируют более тяжелое течение цереброваскулярной патологии у категории ЛПА и согласуются с нашими данными [23].

Эффективная коммуникация между клетками внутри сосудисто-нервного комплекса обеспечивает точную настройку диаметра сосудов головного мозга в соответствии с активностью нейронов

для поддержания церебральной перфузии и удовлетворения метаболических потребностей. Однако при нарушении регуляции мозгового кровообращения параметры перфузии, которые взаимозависимы, начинают меняться. Так, при снижении парциального перфузионного давления происходит компенсаторное расширение церебральных артериол и снижение сосудистого сопротивления. В последующем при продолжающемся снижении парциального перфузионного давления механизмы ауторегуляции перестают функционировать, расширение церебральных сосудов уже не в состоянии обеспечить адекватную перфузию, что приводит к снижению CBV и CBF [24–26]. Этот статистически подтвержденный эффект, определяемый в нашем исследовании, может служить в качестве нейровизуализационных биомаркеров, характеризующих особенности нарушения мозговой перфузии у разных когорт пациентов, но в более выраженной степени – у ЛПА.

Таким образом, течение хронической ишемии головного мозга у ликвидаторов последствий аварии на ЧАЭС имеет определенные особенности, которые необходимо учитывать при дифференциальной диагностике, а также при выборе патогенетической терапии.



## Заключение

Изучение церебрального кровообращения с помощью контрастной МРТ-перфузии и выявление особенностей изменения ее параметров является потенциальным функциональным биомаркером при хронической ишемии головного мозга, что имеет большое значение при обследовании ЛПА и других лиц, подвергшихся техногенному радиационному воздействию. Полученные данные коррелируют с результатами современных нейropsychологических тестов и могут являться основой при создании рекомендаций с четкими критериями для дифференциальной диагностики хронической ишемии головного мозга у различных групп пациентов, страдающих цереброваскулярной болезнью.

## Участие авторов

Сергеев Н.И. – анализ и интерпретация полученных данных, подготовка, создание опубликованной работы.

Куликова Т.А. – обзор публикаций по теме статьи, проведение исследования, написание текста.

Нуднов Н.В. – участие в научном дизайне, ответственность за целостность всех частей статьи.

Солодкий В.А. – концепция и дизайн исследования, утверждение окончательного варианта статьи.

## Authors' participation

Sergeev N.I. – analysis and interpretation of the obtained data, preparation and creation of the published work.

Kulikova T.A. – review of publications, conducting research, writing text.

Nudnov N.V. – participation in scientific design, responsibility for the integrity of all parts of the article.

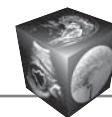
Solodkiy V.A. – concept and design of the study, approval of the final version of the article.

## Список литературы

- Парфенов В.А., Кулеш. А.А. Цереброваскулярное заболевание с когнитивными нарушениями. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова*. 2021; 9 (121): 121–130. <https://doi.org/10.17116/jnevro2021121091121>
- Van Der Flier W., Skoog I., Schneider J.A. et al. Vascular cognitive impairment. *Nat. Rev. Dis. Primers*. 2018; 15 (4): 18003. <https://doi.org/10.1038/nrdp.2018.3>
- Фокин В.Ф., Пономарева Н.В., Коновалов Р.Н., Кротенкова М.В., Медведев Р.Б. и др. Сопряженность динамических характеристик функциональной межполушарной асимметрии с коннективностью у больных хроническими цереброваскулярными заболеваниями. *Асимметрия*. 2019; 13 (3): 40–49. <https://doi.org/10.25692/ASY.2019.13.3.004>
- Новиков В.С., Никифоров А.М., Чепрасов В.Ю. Психологические последствия аварии. *Военно-медицинский журнал*. 1996; 6: 57–62.
- Пострелко В.М., Картель М.Т., Коновалов О.Г. Комплексная терапия экзогенно обусловленных астенодепрессивных состояний с использованием энтеросорбции. *Эфферентная терапия*. 1997; 3: 16–20.
- Харченко В.П., Пескин А.В. Заболеваемость участников ликвидации последствий катастрофы на ЧАЭС по данным Российского регионального межведомственного экспертного совета. *Чернобыль. Катастрофа – 12 лет спустя: Материалы международной науч.-практ. конф.* Москва, 18 апреля, 1996: 55–64.
- Ребрикова В.А., Сергеев Н.И., Котляров П.М., Егорова Е.В., Солодкий В.А. Возможности магнитно-резонансной томографии с перфузионной визуализацией в оценке эффективности лучевой терапии у пациентов с глиобластомами головного мозга (обзор литературы). *Вестник Российской академии наук центра рентгенодиологии*. 2022; 22 (1): 121–140.
- Семенов С.Е., Берген Т.А., Месропян Н.А., Смагина А.В., Юркевич Е.А. Возможности применения перфузионных и диффузионных методов в диагностике солитарного повреждения белого вещества головного мозга. *Российский электронный журнал лучевой диагностики*. 2019; 9 (2): 30–46. <https://doi.org/10.21569/2222-7415-2019-9-2-30-46>
- Lindner T., Bolar D.S., Achten E. et al.; on behalf of the ISMRM Perfusion Study Group. Current state and guidance on arterial spin labeling perfusion MRI in clinical neuroimaging. *Magn. Reson. Med*. 2023; 89 (5): 2024–2047. <https://doi.org/10.1002/mrm.29572>
- Подсонная И.В., Ефремушкин Г.Г., Желобецкая Е.Д. Биоэлектрическая активность головного мозга у ликвидаторов последствий аварии на Чернобыльской АЭС, страдающих дисциркуляторной энцефалопатией и артериальной гипертензией. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова*. 2021; 112 (10): 33–38.
- Алексанин С.С. 30 лет после Чернобыля: патогенетические механизмы формирования соматической патологии, опыт медицинского сопровождения участников ликвидации последствий аварии на Чернобыльской атомной электростанции: монография / Под. ред. С.С. Алексанина. СПб.: Политехника-принт, 2016: 1–506.
- Румянцева Г.М. Психосоматические и сомато-психические аспекты развития психических нарушений у ликвидаторов последствий аварии на ЧАЭС. *Международный журнал радиационной медицины*. 2003; 2 (5): 139–146.
- Лобзин В.Ю. Комплексная ранняя диагностика нарушений когнитивных функций. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова*. 2015; 11 (115): 72–79. <https://doi.org/10.17116/jnevro20151151172-79>
- Левашкина И.М., Серебрякова С.В. Возможности высокопольной магнитно-резонансной томографии в оценке дегенеративных изменений головного мозга у ликвидаторов последствий аварии на Чернобыльской АЭС в отдаленном периоде. *Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях*. 2016; 4: 98–103. <https://doi.org/10.25016/2541-7487-2016-0-4-98-103>
- Kashcheev V.V., Chekin S.Y., Maksiutov M.A. et al. Radiation-epidemiological Study of Cerebrovascular Diseases in the Cohort of Russian Recovery Operation Workers of the Chernobyl Accident. *Health. Phys*. 2016; 111 (2): 192–197. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000000523>
- Боголепова А.Н., Васенина Е.Е., Гомзякова Н.А., Гусев Е.И., Дудченко Н.Г. и др. Клинические рекомендации “Когнитивные расстройства у пациентов пожилого и старческого возраста”. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова*. 2021; 10–3 (121): 6–137. <https://doi.org/10.17116/jnevro20211211036>



17. Куликова Т.А., Мешков Н.А., Солодкий В.А., Нуднов Н.В., Сергеев Н.И. МРТ-признаки структурных и перфузионных изменений при хронической ишемии головного мозга у ликвидаторов последствий аварии на Чернобыльской АЭС в отдаленном периоде. *Медицинская визуализация*. 2024; 28 (3): 65–76. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1490>
18. Румянцева Г.М., Левина Т.М., Чинкина О.В., Степанов А.Л., Соколова Т.Н. Особенности психолого-психиатрических последствий радиационных аварий. *Экология человека*. 2007; 9: 42–47.
19. Левин О.С., Цыганенко Е.В., Чесалин П.В. Нейро-психологические нарушения у лиц, участвовавших в ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС, в отдаленном периоде. *Неврологический журнал*. 2007; 4: 25–32.
20. Iadecola C. The overlap between neurodegenerative and vascular factors in the pathogenesis of dementia. *Acta Neuropathol*. 2010; 3 (120): 287–296. <https://doi.org/10.1007/s00401-010-0718-6>
21. Lo E. H., Rosenberg G. A. The neurovascular unit in health and disease: introduction. *Stroke*. 2009; 40 (3): S2–3. <https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.108.534404>
22. Caplan L.R., Searls D.E., Hon F.K.S. Cerebrovascular Disease. *Med. Clin. N. Am.* 2009; 2 (93): 353–369. <https://doi.org/10.1016/j.mcna.2008.09.004>
23. Горский А.И., Максюттов М.А., Чекин С.Ю., Корело А.М., Кочергина Е.В., Зеленская Н.С., Иванов В.К. Влияние облучения на заболеваемость атеросклерозом среди участников ликвидации последствий аварии на чернобыльской атомной электростанции. *Радиация и риск (Бюллетень национального радиационно-эпидемиологического регистра)*. 2023; 32 (4): 14–23. <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2023-32-4-14-23>
24. Семенов С.Е., Портнов Ю.М., Хромов А.А., Нестеровский А.В., Хромова А.Н., Семенов А.С. Исследование перфузии при нарушениях церебрального кровообращения. Часть II (частная КТ- и МР-семиотика, паттерны патологических изменений). Обзор. *Комплексные проблемы сердечно-сосудистых заболеваний*. 2017; 6 (1): 102–111. <https://doi.org/10.17802/2306-1278-2017-1-102-111>
25. Морозов С.П., Насникова И.Ю., Шмырев В.И., Крыжановский С.М., Бадюл М.И. Перфузионная компьютерная томография в диагностике острого нарушения мозгового кровообращения. *Кремлевская медицина*. 2011; 1: 21–24.
26. Welker K., Boxerman J., Kalnin A. et al. ASFNR Recommendations for Clinical Performance of MR Dynamic Susceptibility Contrast Perfusion Imaging of the Brain. Wintermark and for the American Society of Functional Neuroradiology MR Perfusion Standards and Practice Subcommittee of the ASFNR Clinical Practice Committee. *Am. J. Neuroradiol*. 2015, 36 (6): E41–E51. <https://doi.org/10.3174/ajnr.A4341>
1. Parfenov V.A., Kulesh A.A. Cerebrovascular disease with cognitive impairment. *Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry*. 2021; 9 (121): 121–130. <https://doi.org/10.17116/jnevro2021121091121> (In Russian)
2. Van Der Flier W., Skoog I., Schneider J.A. et al. Vascular cognitive impairment. *Nat. Rev. Dis. Primers*. 2018; 15 (4): 18003. <https://doi.org/10.1038/nrdp.2018.3>
3. Fokin V.F., Ponomareva N.V., Konovalov R.N. et al. Correlation of dynamic characteristics of functional interhemispheric asymmetry with connectivity in patients with chronic cerebrovascular diseases. *Asymmetry*. 2019; 13 (3): 40–49. <https://doi.org/10.25692/ASY.2019.13.3.004> (In Russian)
4. Novikov V.S., Nikiforov A.M., Cheprasov V.Y. Psychological consequences of the accident. *Military Medical Journal*. 1996; 6: 57–62. (In Russian)
5. Postrelko V.M., Kartel M.T., Konovalov O.G. Complex therapy of exogenously conditioned asthenodepressive conditions using enterosorption. *Efferent therapy*. 1997; 3: 16–20. (In Russian)
6. Kharchenko V.P., Peskin A.V. Morbidity of participants of liquidation of consequences of catastrophe at Chernobyl NPP according to the data of Russian regional interdepartmental expert council. Chernobyl. Catastrophe – 12 years later: materials of international. Scientific-practical. Conf., Moscow, April 18, 1996: 55–64. (In Russian)
7. Rebrikova V.A., Sergeev N. I., Kotlyarov P. M., Egorova E.V., Solodkiy V.A. Possibilities of magnetic resonance imaging with perfusion visualization in assessment of efficiency of radiation therapy in patients with glioblastomas of brain (literature review). *Bulletin of the Russian Scientific Center of Roentgenology and Radiology*. 2022; 22 (1): 121–140. (In Russian)
8. Semenov S.E., Bergen T.A., Mesropyan N.A. et al. Possibilities of using perfusion and diffusion methods in the diagnosis of solitary damage to the white matter of the brain. *Russian Electronic Journal of Radiation Diagnostics*. 2019; 9 (2): 30–46. <https://doi.org/10.21569/2222-7415-2019-9-2-30-46> (In Russian)
9. Lindner T., Bolar D.S., Achten E. et al.; on behalf of the ISMRM Perfusion Study Group. Current state and guidance on arterial spin labeling perfusion MRI in clinical neuroimaging. *Magn. Reson. Med*. 2023; 89 (5): 2024–2047. <https://doi.org/10.1002/mrm.29572>
10. Podsonnaya I.V., Efremushkin G.G., Zhelobetskaya E.D. Bioelectrical activity of the brain in liquidators of the consequences of the accident at the Chernobyl nuclear power plant suffering from cerebrovascular accident and arterial hypertension. *S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry*. 2021; 112 (10): 33–38. (In Russian)
11. Aleksanin S.S. 30 years after Chernobyl: pathogenetic mechanisms of formation of somatic pathology, experience of medical support of participants in the liquidation of the consequences of the accident at the Chernobyl nuclear power plant: monograph / Ed. S.S. Aleksanin. SPb.: Politekhnik-print, 2016: 1–506. (In Russian)
12. Rumyantseva G.M. Psychosomatic and somatopsychic aspects of development of mental disorders in liquidators of consequences of the Chernobyl accident. *International Journal of Radiation Medicine*. 2003; 2 (5): 139–146. (In Russian)
13. Lobzin V.Yu. Comprehensive early diagnostics of cognitive functions disorders. *S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry*. 2015; 11 (115): 72–79. <https://doi.org/10.17116/jnevro201511511172-79> (In Russian)
14. Levashkina I.M., Serebryakova S.V. Possibilities of high-field magnetic resonance imaging in assessment of degenerative changes of the brain in liquidators of consequences of the Chernobyl accident in the remote period. *Medical, biological and socio-psychological problems of safety in emergency situations*. 2016; 4: 98–



103. <https://doi.org/10.25016/2541-7487-2016-0-4-98-103> (In Russian)
15. Kashcheev V.V., Chekin S.Y., Maksimov M.A. et al. Radiation-epidemiological Study of Cerebrovascular Diseases in the Cohort of Russian Recovery Operation Workers of the Chernobyl Accident. *Health. Phys.* 2016; 111 (2): 192–197. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000000523>
16. Bogolepova A.N., Vasenina E.E., Gomzyakova N.A. et al. Clinical guidelines “Cognitive disorders in elderly and senile patients”. *Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry*. 2021; 10–3 (121): 6–137. <https://doi.org/10.17116/jnevro20211211036> (In Russian)
17. Kulikova T.A., Meshkov N.A., Solodkiy V.A. et al. MRI signs of structural and perfusion changes in chronic cerebral ischemia in liquidators of the consequences of the Chernobyl accident in the late period. *Medical Visualization*. 2024; 28 (3): 65–76. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1490> (In Russian)
18. Rumyantseva G.M., Levina T.M., Chinkina O.V. et al. Features of psychological and psychiatric consequences of radiation accidents. *Human Ecology*. 2007; 9: 42–47. (In Russian)
19. Levin O.S., Tsyganenko E.V., Chesalin P.V. Neuro-psychological disorders in individuals who participated in the liquidation of the consequences of the Chernobyl accident in the late period. *Neurological Journal*. 2007; 4: 25–32. (In Russian)
20. Iadecola C. The overlap between neurodegenerative and vascular factors in the pathogenesis of dementia. *Acta Neuropathol*. 2010; 3 (120): 287–296. <https://doi.org/10.1007/s00401-010-0718-6>
21. Lo E. H., Rosenberg G. A. The neurovascular unit in health and disease: introduction. *Stroke*. 2009; 40 (3): S2–3. <https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.108.534404>
22. Caplan L.R., Searls D.E., Hon F.K.S. Cerebrovascular Disease. *Med. Clin. N. Am.* 2009; 2 (93): 353–369. <https://doi.org/10.1016/j.mcna.2008.09.004>
23. Gorsky A.I., Maksyutov M.A., Chekin S.Y. et al. The effect of radiation exposure on the incidence of atherosclerosis among participants in the liquidation of the consequences of the accident at the Chernobyl nuclear power plant. *Radiation and Risk (Bulletin of the National Radiation and Epidemiological Registry)*. 2023; 32 (4): 14–23. <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2023-32-4-14-23> (In Russian)
24. Semenov S.E., Portnov Yu.M., Khromov A.A. et al. Perfusion study in cerebral circulatory disorders. Part II (particular CT and MR semiotics, patterns of pathological changes). Review. *Complex Issues of Cardiovascular Diseases*. 2017; 6 (1): 102–111. <https://doi.org/10.17802/2306-1278-2017-1-102-111> (In Russian)
25. Morozov S.P., Nasnikova I.Yu., Shmyrev V.I. et al. Perfusion computed tomography in diagnostics of acute cerebrovascular accident. *Kremlin Medicine*. 2011; 1: 21–24. (In Russian)
26. Welker K., Boxerman J., Kalnin A. et al. ASFNR Recommendations for Clinical Performance of MR Dynamic Susceptibility Contrast Perfusion Imaging of the Brain. Wintermark and for the American Society of Functional Neuroradiology MR Perfusion Standards and Practice Subcommittee of the ASFNR Clinical Practice Committee. *Am. J. Neuroradiol*. 2015, 36 (6): E41–E51. <https://doi.org/10.3174/ajnr.A4341>

**Для корреспонденции\***: Куликова Татьяна Анатольевна – e-mail: tkulikova61@gmail.com

**Сергеев Николай Иванович** – доктор мед. наук, заведующий лабораторией рентгенодиагностики и радиотерапии ФГБУ “Российский научный центр рентгенодиагностики” Минздрава России; профессор кафедры рентгенодиагностики ФДПО ФГАОУ ВО “Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова” Минздрава России, Москва. <https://orcid.org/0000-0003-4147-1928>

**Куликова Татьяна Анатольевна** – канд. мед. наук, заведующая терапевтическим отделением клиники ядерной медицины ФГБУ “Российский научный центр рентгенодиагностики” Минздрава России, Москва. <https://orcid.org/0009-0005-1763-5031>

**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, Москва. <https://orcid.org/0000-0001-5994-0468>

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

**Contact\***: Tatyana A. Kulikova – e-mail: tkulikova61@gmail.com

**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;

Professor of the Department Roentgenoradiology of FDPO of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education Pirogov Russian National Research Medical University, Moscow. <https://orcid.org/0000-0003-4147-1928>

**Tatyana A. Kulikova** – Cand. of Sci. (Med.), Head of the therapeutic department of the Nuclear Medicine Clinic, Russian Scientific Center of Roentgenoradiology of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Moscow. <https://orcid.org/0009-0005-1763-5031>

**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, Moscow. <https://orcid.org/0000-0001-5994-0468>

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



ISSN 1607-0763 (Print); ISSN 2408-9516 (Online)  
<https://doi.org/10.24835/1607-0763-1481>

## Снижение миелинизации белого вещества у пациентов с аффективными расстройствами по данным быстрого картирования макромолекулярной протонной фракции

© Бородина С.О.<sup>4\*</sup>, Буренкова М.Г.<sup>1</sup>, Бородин О.Ю.<sup>3, 4</sup>,  
Смирнова Л.П.<sup>1</sup>, Епимахова Е.В.<sup>1</sup>, Ярных В.Л.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> НИИ психического здоровья Томского НИМЦ РАН; 634014 Томск, ул. Алеутская, д. 4, Российская Федерация

<sup>2</sup> ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет»;  
634050 Томск, пр-т Ленина, д. 36, Российская Федерация

<sup>3</sup> ОГАУЗ «Томский областной онкологический диспансер»; 634009 Томск, пр. Ленина, 115, Российская Федерация

<sup>4</sup> ФГБОУ ВО «Сибирский государственный медицинский университет» Минздрава России; 634050 Томск,  
Московский тракт, д. 2, Российская Федерация

**Цель исследования:** тестирование метода быстрого картирования макромолекулярной протонной фракции (МПФ) в качестве инструмента количественной оценки дефицита миелина при аффективных расстройствах на уровне как общих, так и локальных измерений в семи выделенных регионах интереса обоих полушарий в сравнении с контрольной группой с определением чувствительности и специфичности метода в каждой изучаемой области.

**Материал и методы.** В исследование было включено 24 пациента с аффективными расстройствами, из них у 13 диагностирован текущий депрессивный эпизод в рамках рекуррентного депрессивного расстройства, у 11 человек – биполярное аффективное расстройство. Всем пациентам проводилось бесконтрольное магнитно-резонансное исследование головного мозга с использованием стандартного протокола сканирования и МР-протокола быстрого картирования МПФ. Сравнение показателей МПФ контрольной и экспериментальной групп проводилось с помощью U-критерия Манна–Уитни. Для оценки прогностической ценности изученных параметров был использован ROC-анализ.

**Результаты.** Усредненные показатели МПФ всех выделенных регионов интереса группы контроля и пациентов с аффективными расстройствами значительно различались ( $p < 0,0001$ ). При попарном сравнении каждой выделенной области у больных аффективными расстройствами наблюдалось достоверное снижение МПФ во всех выделенных участках белого вещества по сравнению с контрольной группой ( $p < 0,05$ ). При анализе ROC-кривых наибольшие площади под ROC-кривыми (AUC) составили  $0,892 \pm 0,061$  (83,3%; 88,89%) и  $0,888 \pm 0,054$  (70,83%; 83,3%) у перивентрикулярной зоны и таламуса соответственно, что свидетельствует о «высокой» информативности данных моделей для детекции процесса гипомиелинизации у пациентов с аффективными расстройствами.

**Заключение.** Аффективные расстройства характеризуются значимым снижением МПФ белого вещества головного мозга в сравнении с группой контроля ( $p < 0,05$ ), что свидетельствует о снижении концентрации миелина в исследуемых областях. Процесс гипомиелинизации является диффузным, так как был значимо выражен во всех выделенных регионах интереса у пациентов с аффективными расстройствами, включая перивентрикулярную область и область таламуса и базальных ядер в сравнении с контролем ( $p < 0,05$ ). Наибольшей диагностической ценностью для детекции гипомиелинизации при аффективных расстройствах обладают изменения МПФ в перивентрикулярной зоне (PPV = 91%, NPV = 80%).

**Ключевые слова:** биполярное аффективное расстройство; гипомиелинизация; миелин; молекулярная протонная фракция; рекуррентное депрессивное расстройство

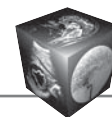
**Авторы подтверждают отсутствие конфликтов интересов.**

**Для цитирования:** Бородина С.О., Буренкова М.Г., Бородин О.Ю., Смирнова Л.П., Епимахова Е.В., Ярных В.Л. Снижение миелинизации белого вещества у пациентов с аффективными расстройствами по данным быстрого картирования макромолекулярной протонной фракции. *Медицинская визуализация*. 2025; 29 (1): 24–32. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1481>

Поступила в редакцию: 05.06.2024.

Принята к печати: 07.10.2024.

Опубликована online: 23.01.2025.



# Reduced myelination of white matter in patients with affective disorders according to fast macromolecular proton fraction mapping

© Sofia O. Borodina<sup>4\*</sup>, Maria G. Burenkova<sup>1</sup>, Oleg Yu. Borodin<sup>3, 4</sup>,  
Lyudmila P. Smirnova<sup>1</sup>, Elena V. Epimakhova<sup>1</sup>, Vasily L. Yarnykh<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Mental Health Research Institute, Tomsk National Research Medical Center of the Russian Academy of Sciences; 4, Aleutskaya str., Tomsk 634014, Russian Federation

<sup>2</sup> Tomsk State University; 36, Lenina prosp., Tomsk 634050, Russian Federation

<sup>3</sup> Tomsk Regional Oncology Dispensary; 115, Lenina prospekt, Tomsk 634009, Russian Federation

<sup>4</sup> Siberian State Medical University; 2, Moskovskii trakt, Tomsk 634050, Russian Federation

**Abstract.** This study aimed to test the method of fast molecular proton fraction mapping as a tool for quantitative assessment of myelin deficiency in affective disorders between general and local measurements in seven selected regions of interest of both hemispheres in comparison with the control group, determining the sensitivity and specificity of the method.

**Materials and methods.** The study included 24 patients with affective disorders, 13 were diagnosed with a current depressive episode as part of recurrent depressive disorder, and 11 were diagnosed with bipolar affective disorder. All patients underwent non-contrast magnetic resonance imaging of the brain using a fast MPF mapping protocol. Comparison of the MPF levels for the control and experimental groups were calculated using the Mann–Whitney U-test. ROC analysis was used to assess the prognostic value of the investigating parameters.

**Results.** The average MPF indices of all selected regions of interest for the control group and group of patients with affective disorders (AD) were significantly different ( $p < 0.0001$ ). In a pairwise comparison of each selected area, patients with AD showed a significant decrease in MPF in all selected areas of white matter compared to the control group ( $p < 0.05$ ). Analyzing the ROC curves, the largest areas under the ROC curves (AUC) were  $0.892 \pm 0.061$  (83.3%; 88.89%) and  $0.888 \pm 0.054$  (70.83%; 83.3%) in the periventricular zone and thalamic area respectively, which indicates the “high” information content of these models for detecting the process of hypomyelination in patients with AR.

**Conclusion.** Affective disorders are characterized by a significant decrease in the MPF of the white matter of the brain in comparison with the control group ( $p < 0.05$ ), which indicates a decrease in the concentration of myelin in the observed areas. The process of hypomyelination is diffuse as it was significantly expressed in all selected regions of interest in patients with affective disorders, including the periventricular zone and the area of thalamus and basal ganglia in comparison with controls ( $p < 0.05$ ). MPF changes in the periventricular zone have the greatest diagnostic value for detecting hypomyelination in AD (PPV = 91%, NPV = 80%).

**Keywords:** bipolar affective disorder; hypomyelination; myelin; molecular proton fraction; recurrent depressive disorder

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

**For citation:** Borodina S.O., Burenkova M.G., Borodin O.Y., Smirnova L.P., Epimakhova E.V., Yarnykh V.L. Reduced myelination of white matter in patients with affective disorders according to fast macromolecular proton fraction mapping. *Medical Visualization*. 2025; 29 (1): 24–32. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1481>

**Received:** 05.06.2024.

**Accepted for publication:** 07.10.2024.

**Published online:** 23.01.2025.

## Введение

Аффективные расстройства, такие как рекуррентное депрессивное расстройство (РДР) и биполярное аффективное расстройство (БАР), являются широко распространенными функционально-нарушающими состояниями, связанными с высоким уровнем самоубийств и тяжелым социальным бременем [1].

Несмотря на распространенность аффективных расстройств, все еще не хватает всеобъемлющего патофизиологического понимания, а также

диагностических биомаркеров данных патологий. За последние годы нейровизуализационные исследования выявили структурные изменения головного мозга у пациентов с депрессией, к которым относятся микроструктурные различия белого вещества, свидетельствующие о снижении плотности миелина [2]. Результаты диффузионно-тензорного исследования пациентов с БАР выявили широко распространенное увеличение коэффициента радиальной диффузии (RD), что подтверждает гипотезу о возможной гипомиели-



низации головного мозга при данном заболевании [3]. Однако данные показатели являются лишь косвенно связанными с содержанием миелина [4], что наталкивает на необходимость поиска более миелинспецифических методов МР-исследования.

Макромолекулярная протонная фракция (МПФ) является ключевым биофизическим параметром, определяющим эффект переноса намагниченности в рамках двухпуловой модели и описывающим относительное количество протонов, характеризующихся полутвердым молекулярным движением и участвующих в магнитной кросс-релаксации со свободными протонами воды. На основании ряда исследований на животных МПФ признана количественным параметром МРТ, тесно связанным с содержанием миелина в нервных тканях [5]. Данный метод уже использовался для неинвазивного измерения дефицита миелина в белом и сером веществе пациентов с шизофренией и выявил значимое глобальное снижение МПФ в белом веществе ( $p = 0,03$ ), что и послужило основанием к выбору данного метода для нашего исследования [6].

**Цель исследования:** тестирование метода быстрого МПФ-картирования в качестве инструмента количественной оценки дефицита миелина при биполярном расстройстве и рекуррентном депрессивном расстройстве на уровне общих измерений белого вещества головного мозга; определение достоверных пороговых значений МПФ в семи выделенных областях интереса обоих полушарий, подверженных значимым изменениям, в здоровой контрольной группе и группах с аффективным расстройством с определением чувствительности и специфичности метода в каждой изучаемой области.

## Материал и методы

Исследование проводилось в отделении аффективных состояний НИИ психического здоровья Томского НИМЦ РАН с декабря 2023 г. по март 2024 г. В работу было включено 24 пациента с аффективными расстройствами, из них 20 женщин и 4 мужчин, средний возраст  $37,6 \pm 15,6$  года. Из них у 13 человек был диагностирован текущий депрессивный эпизод в рамках РДР и у 11 человек БАР по критериям МКБ-10. Медиана давности заболевания составила 11 [3,5; 16,5] лет и медиана возраста пациентов к началу заболевания составила 22 [19; 31,5] года. Группу контроля составили условно здоровые лица ( $n = 24$ ) без ранее зарегистрированных психических и соматических заболеваний, средний возраст пациентов  $36,5 \pm 14,2$  года, из них 19 женщин и 5 мужчин.

Критерием включения пациентов в исследование являлось наличие вышеуказанных диагнозов, поставленных сертифицированными врачами-психиатрами НИИ психического здоровья Томского НИМЦ РАН. Критериями исключения являлись: клинически значимые проявления органического поражения центральной нервной системы, наличие острых и хронических соматических заболеваний, требующих коррекции или медикаментозной терапии.

Для оценки тяжести психического расстройства использовались следующие клинические шкалы: CGI-S (The Clinical Global Impression – Severity Scale) до начала терапии, далее с интервалом 2 нед в ходе проводимой терапии. Для оценки динамики состояния использовалась шкала CGI-I (Clinical Global Impression – Improvement scale). Оценка вероятности расстройств биполярного спектра проводилась с помощью скрининговых шкал HCL-32, MDQ, BSDS. Для оценки не только типичных, но и атипичных депрессивных симптомов использовалась шкала депрессии Гамильтона, версия для сезонных аффективных расстройств. Психометрическая оценка уровня основных показателей тяжести аффективного расстройства при поступлении приведена в табл. 1.

Для выполнения запланированных задач, связанных с обследованием пациентов, разработаны и утверждены следующие документы: протокол исследования, информированное согласие пациента, информационный листок, бланк регистрационной карты пациента. Получено разрешение локального биоэтического комитета при НИИ психического здоровья Томского НИМЦ РАН на проведение исследования № 163 от 12 мая 2023 (дело номер 163/3.2023).

Статистическая обработка полученных результатов осуществлялась с помощью пакета статистического программного обеспечения StatSoft Statistica 10 с определением описательной статистики (средние величины, межквартильный размах).

Всем пациентам проводилось бесконтрастное МР-исследование головного мозга с использованием 1,5 Тл МР-сканера (Ingenia Evolution, Philips, Netherland) по стандартному протоколу и протоколу быстрого картирования МПФ.

Стандартный протокол включал в себя 3D-T1-SE (толщина среза 1,1 мм, TR = 600 мс, TE = 27,7 мс, сагиттальная проекция), T2-FSE (толщина среза 5 мм, TR = 5331 мс, TE = 110 мс, аксиальная проекция), 3D-T2-FLAIR (толщина среза 1,1 мм, TR = 4800 мс, TE = 314,5 мс, сагиттальная проекция). В ходе исследования данных об органической патологии головного мозга не было выявлено, у двух пациентов контрольной группы в области прида-



**Таблица 1.** Психометрическая оценка уровня основных показателей тяжести аффективного расстройства при поступлении, Me [25-й; 75-й перцентили]

**Table 1.** Psychometric assessment of the level of main indicators of the severity of affective disorder upon admission, Me [25th; 75th percentile]

| Психометрический инструмент<br>Psychometric tool                | Баллы<br>Points |
|-----------------------------------------------------------------|-----------------|
| SIGH-SAD:                                                       |                 |
| типичные депрессивные симптомы<br>typical depressive symptoms   | 21 [17.5; 24]   |
| атипичные депрессивные симптомы<br>atypical depressive symptoms | 5 [4; 10.5]     |
| сумма баллов<br>total points                                    | 29 [23.5; 34.5] |
| CGI:                                                            |                 |
| CGI-S                                                           | 4 [4; 4]        |
| CGI-I                                                           | –               |
| HCL-32                                                          | 21 [19.5; 25]   |
| BSDS                                                            | 12 [9; 15]      |
| MDQ                                                             | 10 [8; 13.5]    |

SIGH-SAD – structured Interview Guide For The Hamilton Depression Rating Scale-SAD Version, CGI – clinical global impression scale, CGI-S – clinical global impression severity, CGI-I – clinical global impression improvement, HCL-32 – Hypomania Checklist, BSDS – Bipolar Spectrum Diagnostic Scale, MDQ – Mood Disorder Questionnaire.

точных пазух наблюдались небольшие кисты. Минимальная перивентрикулярная гиперинтенсивность была выявлена у всех пациентов обеих групп, а также небольшое расширение периваскулярных пространств в перивентрикулярной зоне.

Протокол быстрого картирования МПФ был реализован с использованием стандартной трехмерной последовательности градиентного эха производителя в соответствии с одноточечным синтетическим эталонным методом.

Метод основан на восстановлении карт МПФ по трем исходным изображениям с контрастными весами МТ, T1 и протонной плотности (PD) путем воксельного итерационного решения импульсного уравнения МТ.

Для картирования МПФ использовались следующие импульсные последовательности:

1) МТ-взвешенный: TR = 32 мс, время эхосигнала (TE) = 4,6 мс, угол поворота (FA) = 12°, время сканирования 4 мин 11 с.

2) T1-взвешенный: TR = 20 мс, TE = 4,6 мс, FA = 25°, время сканирования 2 мин 37 с.

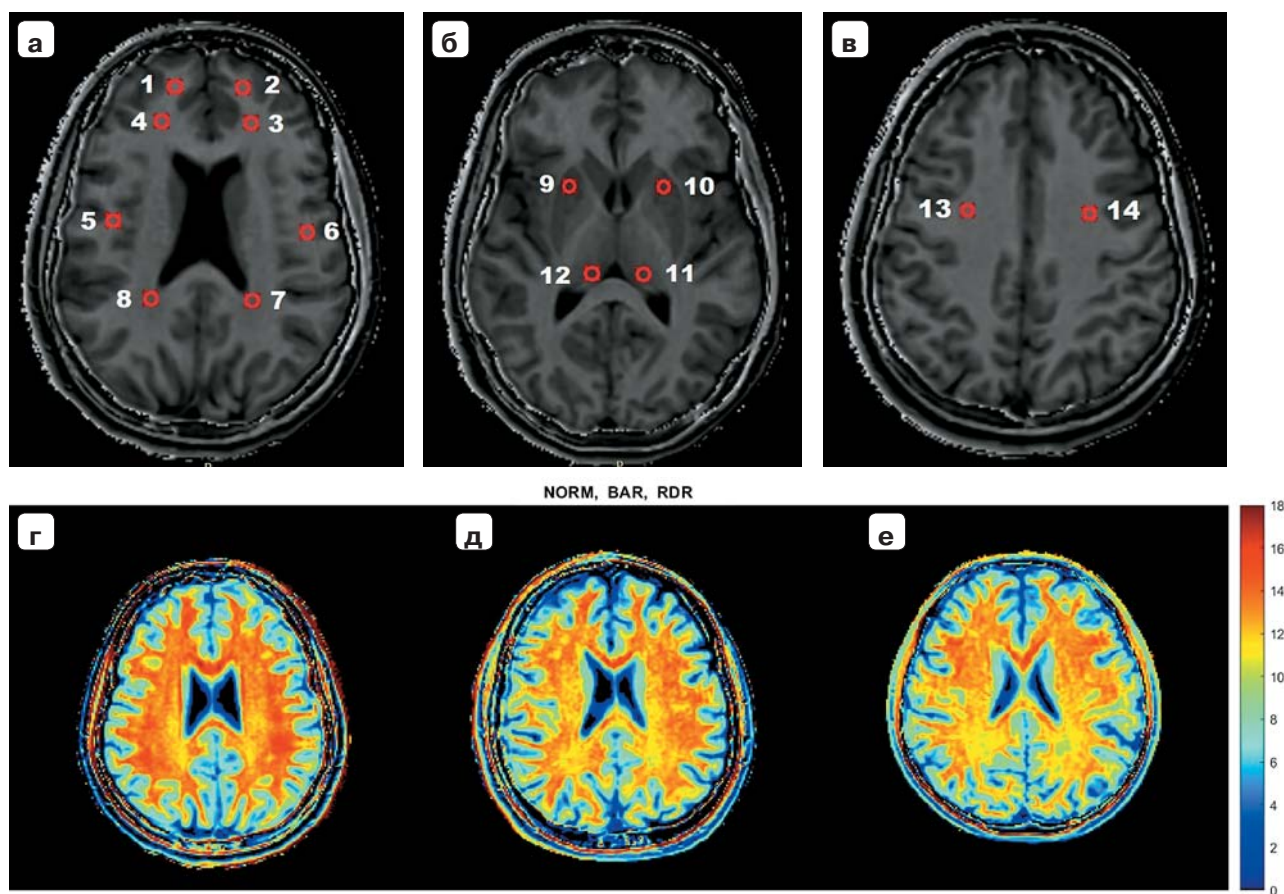
3) PD-взвешенный: TR = 20 мс, TE = 4,6 мс, FA = 4°, время сканирования 2 мин 37 с.

Для МТ-взвешенных изображений применялся стандартный внерезонансный импульс насыщения производителя с гауссовой огибающей, частотой смещения 1,1 кГц с эффективным углом отклонения FA = 520° и длительностью импульса 15 мс.

Карты МПФ были реконструированы с использованием специального программного обеспечения на языке C++ (доступного по адресу <https://www.macromolecularmri.org/>) на основе одноточечного синтетического эталонного алгоритма. Ограничения параметров модели с двумя пулами в одноточечном алгоритме были установлены в соответствии с предыдущей реализацией для 1,5 Тл-данных следующим образом: константа скорости перекрестной релаксации R = 19 с<sup>-1</sup>; T2-связанных протонов макромолекул, T2B = 10 мкс и произведение скорости релаксации R1 и T2 свободных протонов воды R1T2F = 0,055.

Для определения уровня миелинизации белого вещества головного мозга использовалась программа RadiAnt DICOM Viewer (64-bit). Значения параметров для каждого испытуемого были получены путем усреднения значений двусторонних измерений в области белого вещества лобных, височных и теменных долей, а также в перивентрикулярном пространстве, скорлупе, таламусах и глубоких отделах лобных долей, выделенные на картах МПФ в виде эллипсовидных регионов интереса одинакового размера 0,3 см<sup>2</sup>, полученных методом копирования. Анализ данных проводился двумя независимыми квалифицированными экспертами со стажем работы 22 года и 1 год соответственно. Оценка согласия двух экспертов проводилась с использованием каппа-анализа, где коэффициент К интерпретируется следующим образом: <0,2 – плохо; 0,21–0,40 удовлетворительно; 0,41–0,60 умеренно; 0,61–0,80 хорошо; 0,81–1,00 очень хорошо.

Нормальность распределения данных внутри групп участников оценивалась с помощью теста Шапиро–Уилка для выбора подходящего параметрического или непараметрического анализа. Впоследствии были использованы непараметрические критерии, поскольку были выявлены значительные отклонения от нормального распределения в данных выборках. Усредненные показатели МПФ каждой области интереса попарно сравнивали у пациентов с аффективными расстройствами и контрольной группой с помощью U-критерия Манна–Уитни. Для оценки прогностической ценности изученных параметров были получены кривые операционных характеристик (ROC, receiver operating characteristic) с вычислением соответствующей площади под ROC-кривой (AUC, area under ROC curve), а также определялись чувстви-

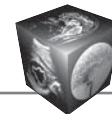


**Рис. 1. а–в.** Примеры построенных МПФ-карт пациентов контрольной группы для наглядной демонстрации областей интереса (ROI), выделенных для анализа. **а** – на уровне нижних отделов тел боковых желудочков зоны интереса в области лобных субкортикальных (1, 2) и глубоких отделов (3, 4), височных (5, 6) и задних перивентрикулярных отделов (7, 8); **б** – на уровне базальных ядер области интереса в проекции скорлупы (9, 10) и таламусов (11, 12); **в** – на уровне верхних отделов боковых желудочков зоны интереса в теменной глубокой области (13, 14).

**г–е.** Клинические примеры построенных МПФ-карт перивентрикулярной зоны пациентов в норме (**г**), при биполярном аффективном расстройстве или БАП (**д**), а также при РДР (**е**). При цветовом картировании определяется диффузное и неоднородное снижение миелинизации (гипомиелинизация) по всем отделам головного мозга.

**Fig. 1. а–в.** Clinical examples of MPF maps of patients in the control group for a visual demonstration of regions of interest (ROI) chosen for analysis: **а** – at the level of the lower sections of the bodies of the lateral ventricles in the area of the frontal subcortical (1, 2) and deep (3, 4) sections, temporal (5, 6) and posterior periventricular (7, 8) sections; **б** – at the level of the basal ganglia of ROI in the projection of the putamen (9, 10) and thalamus (11, 12); **в** – at the level of the upper parts of the lateral ventricles in the parietal deep region (13, 14).

**г–е.** Clinical examples of MPF maps of the periventricular zone of patients from the control group (**г**), with bipolar affective disorder (**д**), as well as with recurrent depressive disorder (**е**). Color mapping reveals a diffuse and heterogeneous decrease in myelination (hypomyelination) throughout all parts of the brain.



тельность (Sensitivity) и специфичность (Specificity) при оптимальном пороге отсечения COV (от англ. cut-off value). Положительная и отрицательная прогностическая значимость (PPV, NPV) оценивалась с помощью теоремы Байеса.

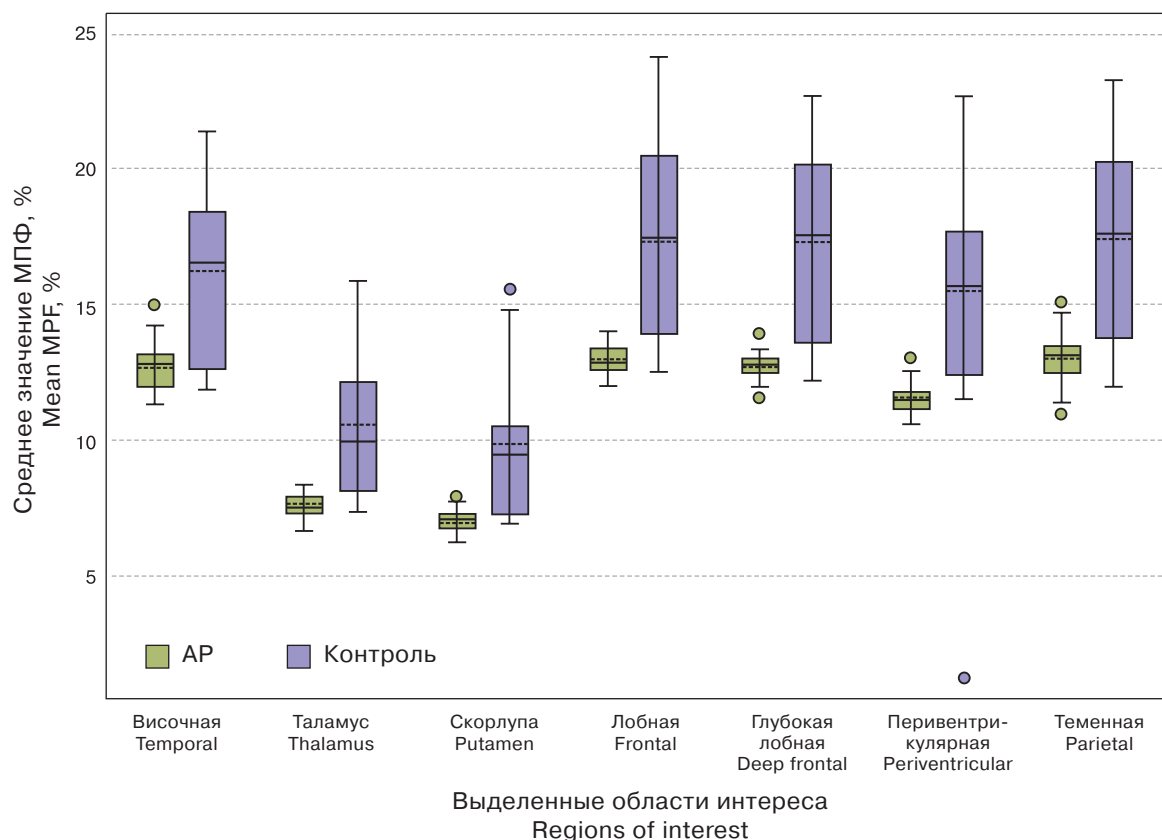
## Результаты

При проведении перекрестной проверки согласия средних величин двух экспертов получена хорошая сходимость результатов методом каппа-анализа ( $\kappa = 0,61$ ).

При сравнении усредненных показателей МПФ всех выделенных регионов интереса белого вещества головного мозга группы контроля и пациентов с аффективными расстройствами были выявлены значимые различия между выборками ( $p < 0,0001$ ). Средние значения МПФ были разделены по регионам интереса белого вещества головного мозга (рис. 1а–в). При картировании МПФ были выявлены значимые различия ( $p < 0,05$ ) в показателях у пациентов контрольной группы (МПФ левый таламус = 9,7%, МПФ правый тала-

мус = 10,4%, МПФ левая скорлупа = 9,5%, МПФ правая скорлупа = 9,3%), пациента с БАР (МПФ левый таламус = 7,5%, МПФ правый таламус = 8,0%, МПФ скорлупа слева = 7,8%, МПФ скорлупа справа = 7,3%) и пациента с РДР (МПФ левый таламус = 7,3%, МПФ правый таламус = 8,0%, МПФ левая скорлупа = 6,9%, МПФ правая скорлупа = 7,2%). При попарном сравнении каждой выделенной области (рис. 2) у больных с аффективными расстройствами (БАР и РДР) наблюдалось достоверное снижение МПФ во всех выделенных участках белого вещества по сравнению с контрольной группой ( $p < 0,05$ ), что проявлялось диффузным и неоднородным снижением МПФ по всем отделам головного мозга (рис. 1г–е).

Оценка качества полученных моделей проводилась с помощью построения ROC-кривых и определения соответствующих площадей AUC, наибольшие из них составили  $0,89 \pm 0,06$  (83,3%; 88,9%) и  $0,89 \pm 0,05$  (70,8%; 83,3%) у перивентрикулярной зоны и таламуса соответственно, что свидетельствует об “очень хорошей” информатив-



**Рис. 2.** Диаграмма размаха, демонстрирующая снижение МПФ во всех выделенных участках белого вещества при сравнении с контрольной группой критерием Манна–Уитни ( $p < 0,05$ ).

**Fig. 2.** Box-and-whiskers plot showing the decrease of MPF in all isolated white matter regions compared to the control group using Mann–Whitney U-test ( $p < 0.05$ ).

**Таблица 2.** Оценка достоверности диагностической модели выявления процесса гипомиелинизации у больных с аффективными расстройствами при помощи ROC-анализа**Table 2.** Assessment of the validity of the diagnostic model for detecting the process of hypomyelination in patients with affective disorder using ROC-analysis

| Зоны интереса<br>Region of interest                              | AUC           | COV    | Чувствительность, %<br>Sensitivity, % | Специфичность, %<br>Specificity, % | PPV, % | NPV, % |
|------------------------------------------------------------------|---------------|--------|---------------------------------------|------------------------------------|--------|--------|
| Височная зона<br>Temporal region                                 | 0.787 ± 0.08  | <13.0  | 62.5                                  | 72.2                               | 74.99  | 59.09  |
| Область таламуса<br>Thalamus region                              | 0.888 ± 0.054 | <7.93  | 70.83                                 | 83.33                              | 84.995 | 68.181 |
| Область скорлупы<br>Putamen region                               | 0.863 ± 0.059 | <7.18  | 70.83                                 | 83.33                              | 84.995 | 68.181 |
| Лобная область<br>Frontal region                                 | 0.86 ± 0.067  | <13.05 | 62.5                                  | 83.33                              | 83.329 | 62.502 |
| Глубокая зона белого вещества лобной доли<br>Deep frontal region | 0.852 ± 0.068 | <13.42 | 91.67                                 | 77.78                              | 84.616 | 87.51  |
| Перивентрикулярная зона<br>Periventricular region                | 0.892 ± 0.061 | <12.02 | 83.33                                 | 88.89                              | 90.91  | 79.99  |
| Теменная область<br>Parietal region                              | 0.838 ± 0.075 | <13.41 | 70.83                                 | 83.33                              | 84.995 | 68.181 |

AUC – area under ROC-curve, COV – cut-off value, PPV – positive predictive value, NPV – negative predictive value.

ности моделей для детекции процесса гипомиелинизации у больных с аффективными расстройствами (табл. 2).

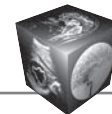
### Обсуждение

В данном исследовании впервые проводилась количественная оценка миелина при аффективных расстройствах с использованием метода быстрого МПФ-картирования. Полученные результаты продемонстрировали, что аффективные расстройства характеризуются диффузным процессом гипомиелинизации белого вещества головного мозга, что согласуется с современной патогенетической концепцией БАР как мультифакториального заболевания [7, 8], приводящего к нарушению миелинизации [9], в то время как в патогенезе депрессивного расстройства миелिनная дисфункция признается одним из этиологических факторов [10].

Наибольшая площадь AUC была выявлена при построении ROC-кривой МПФ-значений перивентрикулярной зоны, что свидетельствует об “очень хорошей” информативности модели и также согласуется с предыдущими исследованиями пациентов с БАР, где были обнаружены очаги гиперинтенсивности перивентрикулярной зоны на T2-взвешенных изображениях [9, 11]. В отличие от БАР, для депрессивного расстройства не было

характерно значимое изменение в перивентрикулярной зоне [12]. Данные результаты у пациентов с биполярным расстройством могут быть объяснены в рамках процесса эндотелиальной дисфункции [13], приводящего к характерным изменениям в перивентрикулярной зоне, наиболее чувствительной к снижению перфузионного давления и мозгового кровотока из-за своего расположения на стыке конечных ветвей главных мозговых артерий [14].

Помимо перивентрикулярной зоны, сравнимо “хорошей” информативностью для верификации патологии обладала AUC ROC-кривой таламической области, что не противоречит результатам более ранних диффузионно-тензорных исследований, где у пациентов с БАР также наблюдалось снижение функции распределения вращения (SDF) в области передней таламической лучистости [15], в то время как у пациентов с депрессивным расстройством наблюдалось снижение фракционной анизотропии в левой передней проекции таламуса [16]. Подобные результаты подтверждают роль таламуса в формировании симптомов депрессивного расстройства и депрессивной фазы БАР, механизм которых может быть объяснен наличием проекционной связи между парафасцикулярными субпопуляциями таламуса и прилежащего ядра, хемогенетическое торможение которого вызывало депрессивное состояние у мышей [17].



**Ограничения.** Данное исследование является пилотным проектом в исследовании МПФ у пациентов с аффективными расстройствами, следовательно, представляет собой лишь предварительный анализ изучаемой совокупности. Поэтому отобранные группы пациентов представляют собой малые выборки, подверженные влиянию высокой гетерогенности по длительности заболевания и высокой вариабельности возрастных отклонений. Из-за малой мощности выборок решено не разделять группы пациентов с биполярным расстройством и рекуррентным депрессивным расстройством, поэтому результаты представляют собой объединенную совокупность данных по аффективным расстройствам в целом.

В данном исследовании мы работали с измерениями отдельных регионов интереса белого вещества головного мозга, а не со всем массивом данных в пределах белого и серого вещества, что несет за собой потерю информации в процессе проектирования модели. С другой стороны, такой подход позволяет исключить усреднение функционально разных зон головного мозга между собой и получить более специфичные результаты для аффективных расстройств. Еще одним ограничением данного исследования являлось отсутствие стандартизации размера инструмента для выделения регионов интереса, а также стандартизации локализации данных областей интереса в указанных областях.

## Заключение

Аффективные расстройства характеризуются значимым снижением МПФ белого вещества головного мозга в сравнении с группой контроля ( $p < 0,05$ ), что свидетельствует о снижении концентрации миелина или гипомиелинизации в исследуемых областях головного мозга.

Процесс гипомиелинизации является диффузным, так как был значимо выражен во всех отделах больших полушарий головного мозга у пациентов с аффективными расстройствами, включая перивентрикулярную область, область таламуса и базальных ядер, в сравнении с контролем ( $p < 0,05$ ).

Пороговые значения МПФ в рамках синдрома гипомиелинизации в различных областях головного мозга определены: для височной доли 13,0%, для лобной доли 13,1%, для глубоких зон лобной доли 13,4%, для теменной доли 13,4%, для перивентрикулярной зоны 12,0%, для таламической области 7,9%, для области скорлупы 7,2% ( $p < 0,0001$ ).

Наибольшей диагностической ценностью для детекции гипомиелинизации при аффективных расстройствах обладают изменения МПФ в перивентрикулярной зоне (PPV = 91%, NPV = 80%).

**Работа поддержана грантом РНФ № 23-75-00023 “Поиск новых молекулярных механизмов аффективных расстройств с целью разработки методов диагностики и прогноза с использованием протомных подходов и нейровизуализации”.**

## Участие авторов

Бородин С.О. – обзор публикаций по теме статьи статистическая обработка данных, анализ и интерпретация полученных данных, написание текста, подготовка, создание опубликованной работы.

Буренкова М.Г. – сбор и обработка данных, участие в научном дизайне.

Бородин О.Ю. – концепция и дизайн исследования, проведение исследования, подготовка и редактирование текста, подготовка, создание опубликованной работы.

Смирнова Л.П. – концепция и дизайн исследования, подготовка и редактирование текста, подготовка, создание опубликованной работы.

Епимахова Е.В. – сбор и обработка данных, участие в научном дизайне, ответственность за целостность всех частей статьи.

Ярных В.Л. – концепция и дизайн исследования, подготовка и редактирование текста, ответственность за целостность всех частей статьи, утверждение окончательного варианта статьи.

## Authors' participation

Borodina S.O. – review of publications statistical analysis, analysis and interpretation of the obtained data, writing text, preparation and creation of the published work.

Burenkova M.G. – collection and analysis of data, participation in scientific design.

Borodin O.Y. – concept and design of the study, conducting research, text preparation and editing, preparation and creation of the published work.

Smirnova L.P. – concept and design of the study, text preparation and editing, preparation and creation of the published work.

Epimahova E.V. – collection and analysis of data, participation in scientific design, responsibility for the integrity of all parts of the article.

Yarnykh V.L. – concept and design of the study, 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. Malhi G.S., Das P., Outhred T. et al. Default mode dysfunction underpins suicidal activity in mood disorders. *Psychol. Med.* 2020; 50: 1214–1223. <https://doi.org/10.1017/S0033291719001132>
2. Wu G., Mei B., Hou X. et al. White matter microstructure changes in adults with major depressive disorder: evidence from diffusion magnetic resonance imaging. *BJPsych Open.* 2023; 9 (3): e101. <https://doi.org/10.1192/bjo.2023.30>
3. Linke J.O., Adleman N.E., Sarlls J. et al. White Matter Microstructure in Pediatric Bipolar Disorder and Disruptive Mood Dysregulation Disorder. *J. Am. Acad. Child Adolesc. Psychiatry.* 2020; 59 (10): 1135–1145. <https://doi.org/10.1016/j.jaac.2019.05.035>
4. Winkiewski P.J., Sabisz A., Naumczyk P. et al. Understanding the Physiopathology Behind Axial and



- Radial Diffusivity Changes – What Do We Know? *Front. Neurol.* 2018; 9. <https://doi.org/10.3389/fneur.2018.00092>
5. Kisel A.A., Naumova A.V., Yarnykh V.L. Macromolecular Proton Fraction as a Myelin Biomarker: Principles, Validation, and Applications. *Front. Neurosci.* 2022; 16: 819–912. <https://doi.org/10.3389/fnins.2022.819912>
  6. Smirnova L.P., Yarnykh V.L., Parshukova D.A. et al. Global hypomyelination of the brain white and gray matter in schizophrenia: quantitative imaging using macromolecular proton fraction. *Transl. Psychiatr.* 2021; 11 (1): 365. <https://doi.org/10.1038/s41398-021-01475-8>
  7. Kamaeva D.A., Smirnova L.P., Vasilieva S.N. et al. Catalytic Antibodies in Bipolar Disorder: Serum IgGs Hydrolyze Myelin Basic Protein. *Int. J. Mol. Sci.* 2022; 23 (13): 7397. <https://doi.org/10.3390/ijms23137397>
  8. Rantala M.J., Luoto S., Borra-León J.L., Krams I. Bipolar disorder: An evolutionary psychoneuroimmunological approach. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2021; 122: 28–37. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2020.12.031>
  9. Valdés-Tovar M., Rodríguez-Ramírez A.M., Rodríguez-Cárdenas L. et al. Insights into myelin dysfunction in schizophrenia and bipolar disorder. *Wld J. Psychiatr.* 2022; 12 (2): 264–285. <https://doi.org/10.5498/wjp.v12.i2.264>
  10. Fries G.R., Saldana V.A., Finnstein J., Rein T. Molecular pathways of major depressive disorder converge on the synapse. *Mol. Psychiatr.* 2023; 28 (1): 284–297. <https://doi.org/10.1038/s41380-022-01806-1>
  11. Kiesepää T., Mäntylä R., Luoma K. et al. White Matter Hyperintensities after Five-Year Follow-Up and a Cross-Sectional FA Decrease in Bipolar I and Major Depressive Patients. *Neuropsychobiology.* 2022; 81 (1): 39–50. <https://doi.org/10.1159/000516234>
  12. Oudega M.L., Siddiqui A., Wattjes M.P. et al. Are Apathy and Depressive Symptoms Related to Vascular White Matter Hyperintensities in Severe Late Life Depression? *J. Geriatr. Psychiatr. Neurol.* 2021; 34 (1): 21–28. <https://doi.org/10.1177/0891988720901783>
  13. Saccaro L.F., Schilliger Z., Dayer A. et al. Inflammation, anxiety, and stress in bipolar disorder and borderline personality disorder: A narrative review. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2021; 127: 184–192. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2021.04.017>
  14. Юсупова Э.Ф., Гайнетдинова Д.Д. Перивентрикулярная лейкомаляция: этиология, патогенез, клиника, исходы. *Вопросы современной педиатрии.* 2010; 9 (4): 68–72. Yusupova E.F., Gaynetdinova D.D. Periventricular leucomalacia: etiology, pathogenesis, clinical signs, outcomes. *Voprosy sovremennoy pediatrii= Issues of modern pediatrics.* 2010; 9 (4): 68–72. (In Russian)
  15. Brown J.A., Jackson B.S., Burton C.R. et al. Reduced white matter microstructure in bipolar disorder with and without psychosis. *Bipolar Disord.* 2021; 23 (8): 801–809. <https://doi.org/10.1111/bdi.13055>
  16. Zhou L., Wang L., Wang M. et al. Alterations in white matter microarchitecture in adolescents and young adults with major depressive disorder: A voxel-based meta-analysis of diffusion tensor imaging. *Psychiatr. Res. Neuroimaging.* 2022; 323: 111482. <https://doi.org/10.1016/j.pscychresns.2022.111482>
  17. Zhang Y., Roy D.S., Zhu Y. et al. Targeting thalamic circuits rescues motor and mood deficits in PD mice. *Nature.* 2022; 607 (7918): 321–329. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04806-x>

**Для корреспонденции\*:** Бородина Софья Олеговна – e-mail: borsofya@gmail.com

**Бородина Софья Олеговна** – врач-ординатор кафедры неврологии и нейрохирургии ФГБОУ ВО “Сибирский государственный медицинский университет” Минздрава России, Томск. <https://orcid.org/0000-0002-2020-3927>

**Буренкова Мария Геннадьевна** – врач-психиатр НИИ психического здоровья Томского НИМЦ РАН, Томск. <https://orcid.org/0009-0006-3971-1821>

**Бородин Олег Юрьевич** – доктор мед. наук, заведующий отделением рентгенодиагностики ОГАУЗ “Томский областной онкологический диспансер”; профессор кафедры биофизики и функциональной диагностики ФГБОУ ВО “Сибирский государственный медицинский университет” Минздрава России, Томск. <https://orcid.org/0000-0002-5031-1355>

**Смирнова Людмила Павловна** – канд. мед. наук, старший научный сотрудник лаборатории молекулярной генетики и биохимии НИИ психического здоровья Томского НИМЦ РАН, Томск. <https://orcid.org/0000-0003-0083-9124>

**Епимахова Елена Викторовна** – канд. биол. наук, научный сотрудник отделения аддитивных состояний НИИ психического здоровья Томского НИМЦ РАН, Томск. <https://orcid.org/0000-0002-9304-4496>

**Ярных Василий Леонидович** – канд. хим. наук, профессор НИИ биологии и биофизики ФГАОУ ВО “Национальный исследовательский Томский государственный университет”, Томск. <https://orcid.org/0000-0002-1583-8979>

**Contact\*:** Sofia O. Borodina – e-mail: borsofya@gmail.com

**Sofia O. Borodina** – resident of the Department of Neurology and Neurosurgery of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Siberian State Medical University” of the Ministry of Health of the Russian Federation, Tomsk. <https://orcid.org/0000-0002-2020-3927>

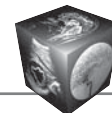
**Maria G. Burenkova** – psychiatrist, Research Institute of Mental Health, Tomsk National Research Medical Center of the Russian Academy of Sciences, Tomsk. <https://orcid.org/0009-0006-3971-1821>

**Oleg Yu. Borodin** – Doct. of Sci. (Med.), Head of the X-ray diagnostics department, Tomsk Regional Oncology Dispensary; Professor of the Department of Biophysics and Functional Diagnostics, Siberian State Medical University, Tomsk. <https://orcid.org/0000-0002-5031-1355>

**Lyudmila P. Smirnova** – Cand. of Sci. (Med.), senior researcher at the laboratory of molecular genetics and biochemistry of the Research Institute of Mental Health of the Tomsk National Research Medical Center, Tomsk. <https://orcid.org/0000-0003-0083-9124>

**Elena V. Epimakhova** – Cand. of Sci. (Biol.), research fellow of the department of addictive states of the Research Institute of Mental Health of the Tomsk National Research Medical Center of the Russian Academy of Sciences, Tomsk. <https://orcid.org/0000-0002-9304-4496>

**Vasily L. Yarnykh** – Cand. of Sci. (Chem.), professor of the Research Institute of Biology and Biophysics of Tomsk State University, Tomsk. <https://orcid.org/0000-0002-1583-8979>



ISSN 1607-0763 (Print); ISSN 2408-9516 (Online)

<https://doi.org/10.24835/1607-0763-1498>

## Интегральная ультразвуковая шкала оценки ретробульбарного кровотока при сахарном диабете 1 типа в молодом возрасте

© Фомина С.В.\*, Самойлова Ю.Г., Завадовская В.Д., Кошмелева М.В., Качанов Д.А., Трифонова Е.И., Зоркальцев М.А., Юн В.Э.

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный медицинский университет» Минздрава России; 634050 Томск, Московский тракт, д. 2, Российская Федерация

Безопасное динамическое наблюдение и оценка ранних изменений гемодинамики глаз у пациентов молодого возраста с сахарным диабетом 1 типа являются первостепенной задачей. Ультразвуковая доплерография широко используется в офтальмологии в оценке кровоснабжения глазного яблока и орбиты. Метод доступный, безопасный, безболезненный, может быть использован для динамического наблюдения изменений гемодинамики глаза и орбиты у детей и подростков с сахарным диабетом 1 типа.

**Цель исследования:** разработать шкалу ультразвуковой интегральной оценки нарушений кровотока ретробульбарных сосудов у пациентов с сахарным диабетом 1 типа в раннем возрасте.

**Материал и методы.** Исследование включало данные 223 детей в возрасте от 7 до 18 лет: с сахарным диабетом 1 типа 173 ребенка, контрольная группа 50 детей. При анализе учитывались ультразвуковые показатели в В-режиме, режиме доплерографии, данные офтальмоскопии.

**Результаты** проведенного исследования дают возможность использования ультразвуковой шкалы Orh-RADS для комплексной оценки ретробульбарного кровотока у пациентов с сахарным диабетом 1 типа в молодом возрасте.

**Ключевые слова:** сахарный диабет; диабетическая ретинопатия; ретробульбарный кровоток; ультразвуковое исследование; доплерография; скорость кровотока; индекс периферического сопротивления; дети; подростки

**Авторы подтверждают отсутствие конфликтов интересов.**

**Для цитирования:** Фомина С.В., Самойлова Ю.Г., Завадовская В.Д., Кошмелева М.В., Качанов Д.А., Трифонова Е.И., Зоркальцев М.А., Юн В.Э. Интегральная ультразвуковая шкала оценки ретробульбарного кровотока при сахарном диабете 1 типа в молодом возрасте. *Медицинская визуализация*. 2025; 29 (1): 33–40. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1498>

Поступила в редакцию: 05.09.2024.

Принята к печати: 05.09.2024.

Опубликована online: 17.01.2025.

## Integral ultrasound scale for assessing retrobulbar blood flow in type 1 diabetes mellitus at a young age

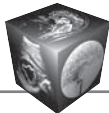
© Svetlana V. Fomina\*, Iuliia G. Samoilova, Vera D. Zavadovskaya, Marina V. Koshmeleva, Dmitriy A. Kachanov, Ekaterina I. Trifonova, Maxim A. Zorkaltsev, Vera E. Yun

Siberian State Medical University; 2, Moskovskii trakt, Tomsk 634050, Russian Federation

Safe follow-up and assessment of early changes in ocular hemodynamics in young patients with type 1 diabetes mellitus is of paramount importance. Doppler ultrasound is widely used in ophthalmology to assess the blood supply to the eyeball and orbit. The method is accessible, safe, painless, and can be used for dynamic monitoring of changes in the hemodynamics of the eye and orbit in children and adolescents with type 1 diabetes mellitus.

**Objective:** to develop an ultrasound scale for a comprehensive assessment of changes in retrobulbar blood flow in patients with type 1 diabetes mellitus in childhood and adolescence.

**Materials and methods.** The study included data from 223 children aged 7–18 years, 173 children with type 1



diabetes, and a control group – 50 children. The analysis took into account ultrasound indicators in b-mode, Doppler mode, and ophthalmoscopy data.

**The results** obtained from the study report the possibilities of using the Oph-RADS ultrasound scale for a comprehensive assessment of retrobulbar blood flow in patients with type 1 diabetes mellitus at a young age.

**Keywords:** diabetes mellitus; diabetic retinopathy; retrobulbar blood flow; ultrasound; Dopplerography; blood flow velocity; peripheral resistance index; children; adolescents

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

**For citation:** Fomina S.V., Samoilova Iu.G., Zavadovskaya V.D., Koshmeleva M.V., Kachanov D.A., Trifonova E.I., Zorkaltsev M.A., Yun V.E. Integral ultrasound scale for assessing retrobulbar blood flow in type 1 diabetes mellitus at a young age. *Medical Visualization*. 2025; 29 (1): 33–40. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1498>

**Received:** 05.09.2024.

**Accepted for publication:** 05.09.2024.

**Published online:** 17.01.2025.

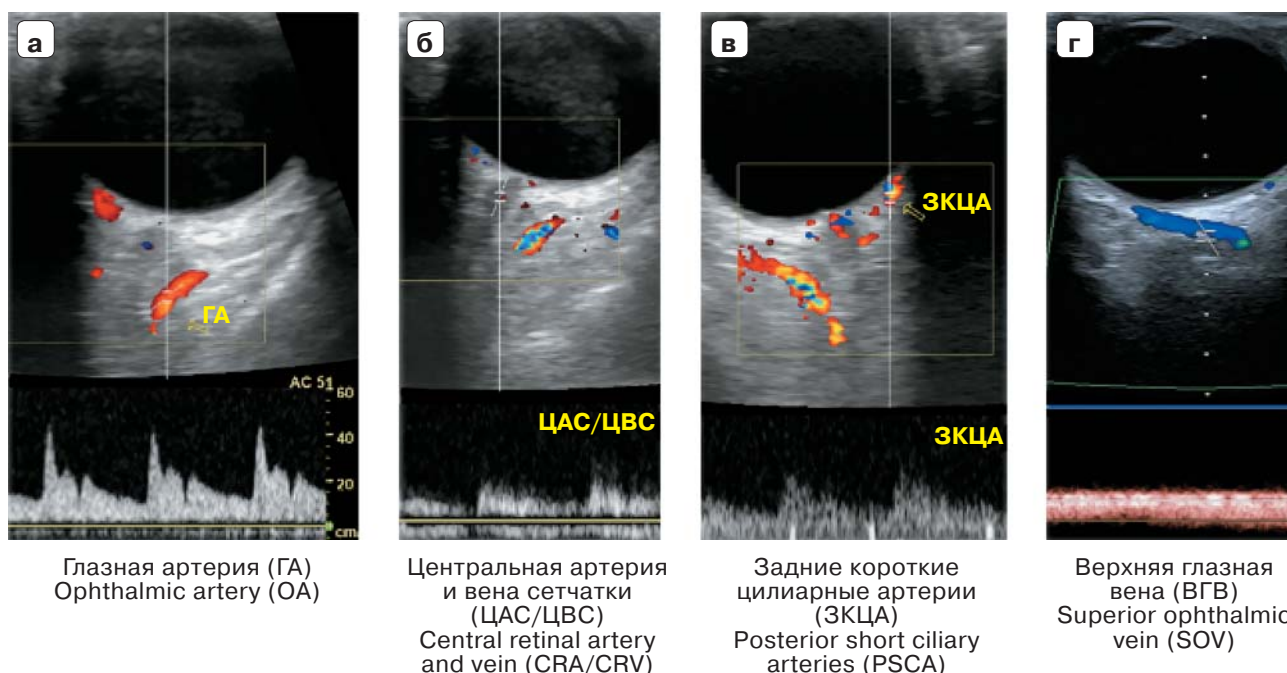
## Введение

Осложнения сахарного диабета (СД) в детском возрасте характеризуются скрытым течением и напрямую отражаются на качестве жизни пациентов в будущем. Одним из часто встречаемых осложнений является диабетическая ретинопатия (ДР) [1–3]. Безопасное, безболезненное динамическое наблюдение изменений кровоснабжения глаза и орбиты у пациентов с СД в молодом возрасте является приоритетной задачей современной медицины [4–6].

В перечень ежегодного наблюдения детей с СД, начиная с 11 лет, включены обязательные осмотры врача-офтальмолога с использованием инструментальных методов, таких как офтальмоскопия, биомикроскопия. Точность методов за-

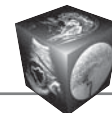
висит от прозрачности светопреломляющих сред, хрусталика и стекловидного тела [6, 7].

Ультразвуковая диагностика (УЗД) является быстрым, безопасным, высокоточным методом, широко используемым в офтальмологии, в оценке изменений передних и задних отделов глаза, ретробульбарной зоны, в лоцировании образований. Цветовая и импульсно-волновая доплерография оценивает кровоснабжение проминирующих образований глаза, образований орбиты, измеряет гемодинамические показатели кровотока сосудов, кровоснабжающих сетчатку, сосудистую оболочку и другие структуры глаза (рис. 1). Преимуществом УЗД является низкая зависимость точности метода от прозрачности хрусталика и стекловидного тела [8].



**Рис. 1 (а–г).** Ультразвуковая доплерография ретробульбарных сосудов.

**Fig. 1 (a–g).** Ultrasound Dopplerography of retrobulbar vessels.



Данные литературы сообщают о наличии ультразвуковых изменений линейной скорости кровотока и периферического сопротивления по ретробульбарным сосудам, представленным на рис. 1, при СД [9–14]. Большинство ученых регистрируют снижение скорости кровотока, повышение периферического сопротивления по центральной артерии сетчатки (ЦАС), глазной артерии (ГА), задним коротким цилиарным артериям (ЗКЦА), что свидетельствует о развитии ишемии сетчатки, сосудистой оболочки при хронической гипергликемии и может приводить к ДР [9–11, 15]. Ультразвуковая гемодинамика ретробульбарных сосудов на ранних стадиях ДР в публикациях характеризуется противоречивостью по виду сосуда (ЦАС, ГА или ЗКЦА), в котором возникают более выраженные изменения, но большая часть авторов выражают общее мнение о регистрации ультразвуковых изменений в сосудах ретробульбарной области раньше изменения сосудистого рисунка на глазном дне [8, 10, 13].

Комплексная интегральная оценка ультразвуковых изменений ретробульбарного кровотока у пациентов с СД 1 типа молодого возраста сделает возможным не только количественную оценку первичных изменений, но и откроет возможность проведения эффективного ультразвукового мониторинга изменений кровоснабжения глаза и орбиты, что благоприятно скажется на отдаленных результатах лечения.

**Цель исследования:** разработать шкалу ультразвуковой интегральной оценки нарушений кровотока ретробульбарных сосудов у пациентов с СД 1 типа в раннем возрасте.

## Материал и методы

Исследование проведено в клиниках Сибирского государственного медицинского университета (Заключение Этического комитета ФГБОУ ВО СибГМУ Минздрава России № 9518 от 28.08.2023).

Было обследовано 223 ребенка. Возраст детей варьировал от 7 до 18 лет. Из них с СД 1 типа, с уровнем гликированного гемоглобина от 7,6 до 10,4% было 173 ребенка. 50 детей без СД составляли контрольную группу.

Изменения на глазном дне у обследуемых пациентов оценивались при офтальмологическом обследовании с использованием офтальмоскопии.

Офтальмологическое ультразвуковое исследование (УЗИ) выполняли на современном ультразвуковом сканере Canon Aplio i 700 высокочастотным линейным датчиком 17 МГц. Большое внимание при исследовании уделяли соблюдению правил безопасности использования ультразвука в офтальмологии [8, 16]. Измерения линейной

скорости кровотока и периферического сопротивления проводили несколько раз по ГА, ЦАС, центральной вене сетчатки (ЦВС), ЗКЦА, верхней глазной вене (ВГВ) каждого глаза (билатерально), в протокол исследования вносили истинные, наиболее часто повторяющиеся значения. За нормативные значения ретробульбарного кровотока принимали общепринятые данные [8]. Зрительный нерв оценивали в ретробульбарной области на расстоянии 3 мм от вершины зрительного нерва (рис. 2). Измерение толщины зрительного нерва проводили с захватом оболочек нерва, а именно мягкой мозговой оболочки, субарахноидального пространства, паутинной оболочки и твердой мозговой оболочки.

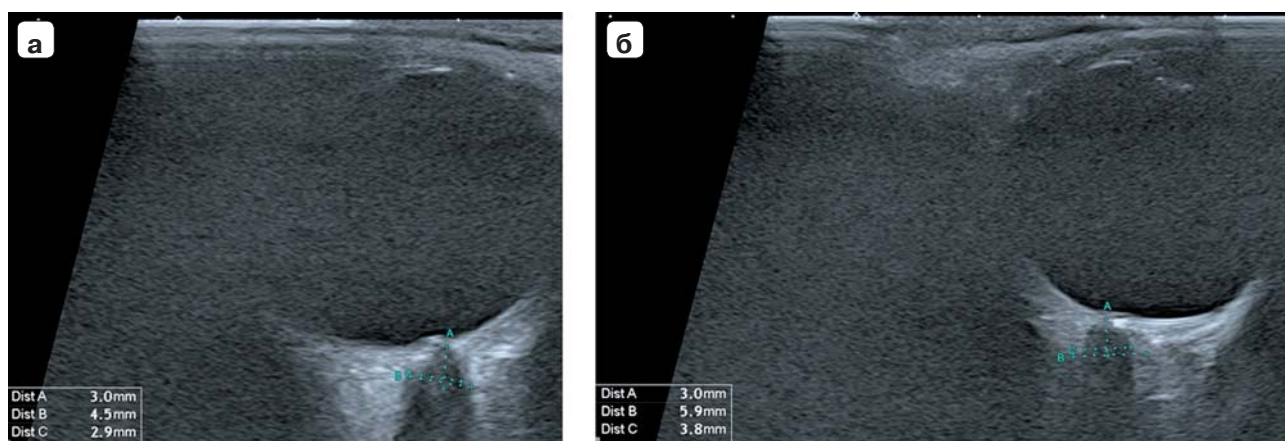
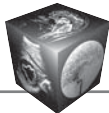
Пациенты при исследовании находились в положении лежа на спине с закрытыми глазами. Ультразвуковое сканирование проводили с небольшим количеством геля. Первый этап включал нативное исследование с оценкой передних и задних отделов глаза и орбиты, включая зрительный нерв. На втором этапе для лоцирования кровотока и измерения линейной скорости кровотока, индекса резистентности по ГА, ЦАС, ЦВС, ЗКЦА, ВГВ использовали цветовую доплерографию и импульсноволновой доплер.

Для статистической обработки данных использовались программы Statistica 13.3, StatTech v.4.4.1. Математический анализ включал три этапа. На первом этапе были вычислены непараметрические описательные характеристики, медиана и 25–75-й процентиля количественных данных. Второй этап включал анализ различий двух независимых групп с использованием критерия Манна–Уитни. На третьем этапе были вычислены весовые коэффициенты признаков методом логистической регрессии с вычислением разделяющей точки признака (cut-off) по наивысшему значению индекса Юдена и определения диагностической точности метода при прогнозировании исхода анализом ROC-кривых. За уровень значимости был принят  $p < 0,05$ .

## Результаты исследования

Изменения ультразвуковых показателей кровотока по ГА, ЦАС, ЦВС, ЗКЦА при СД 1 типа в молодом возрасте, зависимость и вариабельность от факторов риска, выявленные нами на предыдущем этапе исследования, демонстрируют необходимость интегрального комплексного подхода к оценке кровоснабжения глазного яблока, включающей крупные и мелкие ретробульбарные сосуды, а также зрительный нерв (рис. 2, 3) [15].

Нами была выдвинута гипотеза о возможности комплексно охарактеризовать ретробульбарный



**Рис. 2.** Ультразвуковое исследование зрительного нерва. **а** – неизмененный зрительный нерв; **б** – утолщенный зрительный нерв. Dist A – расстоянию 3 мм от вершины зрительного нерва до зоны измерения, Dist B – толщина зрительного нерва с оболочками, Dist C – толщина зрительного нерва без оболочек.

**Fig. 2.** Ultrasound examination of the optic nerve. **a** – unchanged optic nerve; **б** – thickened optic nerve. Dist A – distance of 3 mm from the apex of the optic nerve to the measurement zone, Dist B – thickness of the optic nerve with sheaths, Dist C – thickness of the optic nerve without sheaths.



**Рис. 3.** Ультразвуковая доплерография кровотока центральной артерии сетчатки (ЦАС). **а** – неизменный кровоток, ЛСК = 12,5 см/с; **б** – сниженный кровоток, ЛСК = 9,5 см/с. ЛСК – линейная скорость кровотока.

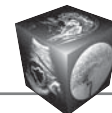
**Fig. 3.** Doppler ultrasound of central retinal artery (CRA) blood flow. **a** – constant blood flow, LSC = 12.5 cm/sec; **б** – reduced blood flow, LSC = 9.5 cm/sec. CRA – central retinal artery, LSC – linear blood flow velocity.

кровоток и зрительные нервы с использованием “ультразвуковой шкалы Oph-RADS”, представленной в табл. 1. Использование данной шкалы позволит характеризовать и вести динамическое наблюдение изменений ретробульбарного кровотока при одновременном анализе сосудов большого и малого диаметра.

Для оценки весовых коэффициентов показателей ретробульбарного кровотока, толщины зрительного нерва был проведен анализ логистической регрессии. В ходе анализа были сопоставле-

ны значения показателей ультразвуковой доплерографии ретробульбарных сосудов, зрительного нерва с данными состояния глазного дна, полученными при офтальмоскопии. Вычисленные весовые коэффициенты приведены в табл. 1.

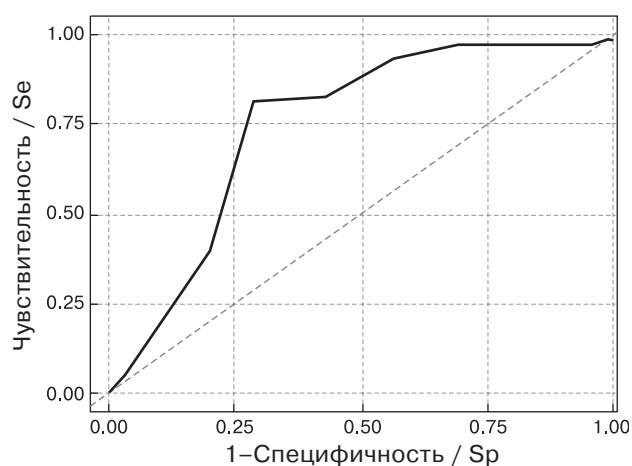
Следующий этап включал оценку диагностической точности определения ишемии глазного дна ультразвуковой шкалой Oph-RADS методом анализа ROC-кривых, точка cut-off для установки порогового значения вычислялась по максимальному значению индекса Юдена (рис. 4, 5).



**Таблица 1.** Весовые коэффициенты для вычисления риска развития ишемии глазного дна у молодых пациентов с сахарным диабетом 1 типа. Ультразвуковая шкала (Oph-RADS)

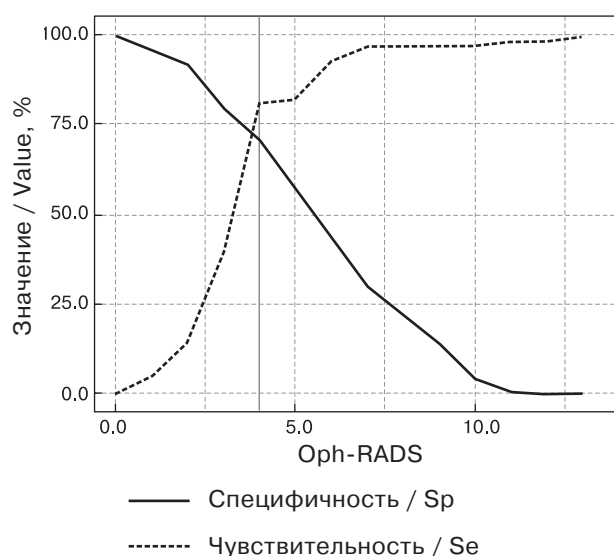
**Table 1.** Weighting coefficients for calculating the risk of developing fundus ischemia in young patients with type 1 diabetes. Ultrasound scale (Oph-RADS)

| Показатели ретробульбарного кровотока, зрительных нервов<br>Indicators of retrobulbar blood flow, optic nerves |                | Пороговые значения<br>Range | Весовой коэффициент<br>Weight factor           |                        |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-----------------------------|------------------------------------------------|------------------------|
|                                                                                                                |                |                             | правый глаз<br>right eye                       | левый глаз<br>left eye |
| ГА, см/с                                                                                                       | Есть изменения | <30 см/с                    | 4                                              | 4                      |
| ОА, см/с                                                                                                       | Нет изменений  | ≥30 см/с                    | 0                                              | 0                      |
| ГА, RI                                                                                                         | Есть изменения | >0.80                       | 1                                              | 1                      |
| ОА, RI                                                                                                         | Нет изменений  | ≤0.80                       | 0                                              | 0                      |
| ЦАС, см/с                                                                                                      | Есть изменения | <10.3 см/с                  | 2                                              | 2                      |
| CRA, см/с                                                                                                      | Нет изменений  | ≥10.3 см/с                  | 0                                              | 0                      |
| ЗКЦА, см/с                                                                                                     | Есть изменения | <12 см/с                    | 1                                              | 1                      |
| PSCA, см/с                                                                                                     | Нет изменений  | ≥12 см/с                    | 0                                              | 0                      |
| ЗКЦА, RI                                                                                                       | Есть изменения | >0.65                       | 1                                              | 1                      |
| PSCA, RI                                                                                                       | Нет изменений  | ≤0.65                       | 0                                              | 0                      |
| ЦВС, см/с                                                                                                      | Есть изменения | <4.5 см/с                   | 1                                              | 1                      |
| CRV, см/с                                                                                                      | Нет изменений  | ≥4.5 см/с                   | 0                                              | 0                      |
| Толщина зрительного нерва с оболочками, мм<br>Thickness of the optic nerve with membranes, mm                  | Есть изменения | >5 мм                       | 1                                              | 1                      |
|                                                                                                                | Нет изменений  | ≤5 мм                       | 0                                              | 0                      |
| Сумма баллов Oph-RADS<br>Total Oph-RADS points                                                                 |                |                             | Максимальное значение 22<br>[Maximum value 22] |                        |



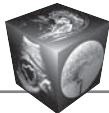
**Рис. 4.** ROC-кривая, характеризующая зависимость “изменения кровоснабжения” глазного дна от шкалы Oph-RADS.

**Fig. 4.** ROC curve characterizing the relationship between “Changes in blood supply” of the fundus and the Oph-RADS scale.



**Рис. 5.** Анализ чувствительности и специфичности модели в зависимости от пороговых значений шкалы Oph-RADS.

**Fig. 5.** Analysis of sensitivity and specificity of the model depending on the threshold values of the Oph-RADS scale.

**Таблица 2.** Пороговые значения шкалы Oph-RADS**Table 2.** Threshold values of the Oph-RADS scale

| Порог / Range | Чувствительность (Se), % | Специфичность (Sp), % |
|---------------|--------------------------|-----------------------|
| 5.00          | 82.7                     | 57.4                  |
| 4.00          | 81.3                     | 71.3                  |

Площадь под ROC-кривой составила  $0,749 \pm 0,035$  с 95% доверительным интервалом (ДИ): 0,681–0,817, с уровнем значимости  $p < 0,001$ .

Разделяющее значение интегральной ультразвуковой шкалы Oph-RADS с максимальным значением индекса Юдена составило 4,000 (табл. 2). При значении интегральной ультразвуковой шкалы Oph-RADS ниже порогового значения 4 прогнозировалось отсутствие ишемии глазного дна, а при превышении данного порогового значения шкалы – наличие ишемии глазного дна. Чувствительность модели равна 81,3%, специфичность модели – 71,3% (см. рис. 5). Ложноположительные результаты регистрировались у 13% пациентов, а ложноотрицательные – у 10%.

Практическое применение данной шкалы включает присвоение баллов, указанных в табл. 1, каждому показателю ретробульбарного кровотока, зрительному нерву с последующим суммированием баллов и сопоставлением с пороговым значением, равным 4.

Данная интегральная ультразвуковая шкала характеризует значения скоростей кровотока и периферического сопротивления по ГА, ЦАС, ЦВС, ЗКЦА, а также структуру зрительного нерва, как единое комплексное число, отражающее ультразвуковую гемодинамику ретробульбарного кровотока.

## Обсуждение

Данные библиографических источников, а также результаты собственных исследований на предыдущих этапах свидетельствуют о развитии ишемии сетчатки, сосудистой оболочки и части диска зрительного нерва у пациентов с СД 1 типа в молодом возрасте [9, 10, 12, 15]. Отсутствие в нашем исследовании на глазном дне при офтальмоскопии признаков ДР, включающих кровоизлияния в сетчатку, экссудаты, микроаневризмы, гемофтальм, отслойку сетчатки, позволяет делать предположения о более ранних изменениях кровотока ретробульбарных сосудов, чем ретинальных, что согласуется с мнением ряда ученых [9, 10, 12, 15].

Гемодинамике ретробульбарных сосудов у пациентов с СД 1 типа в молодом возрасте свойственна вариабельность от длительности заболева-

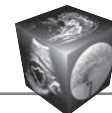
ния, гипергликемии, дислипидемии [15]. Комплексная оценка гемодинамики и состояния зрительного нерва с использованием безопасной и безболезненной ультразвуковой шкалы Oph-RADS создает предпосылки выявления ранних признаков ишемии ретинальных сосудов на глазном дне, а также является инструментом персонализированного мониторинга в клинической практике врача УЗД (см. табл. 1). Наличие ложноположительных результатов, полученных при использовании интегральной ультразвуковой шкалы, может соответствовать изменениям ретробульбарного кровотока, которые с течением времени отразятся на картине глазного дна. И напротив, наличие ложноотрицательных результатов свидетельствует о неоднозначной картине развития ишемии глазного дна и требует дальнейшего изучения.

В основе изменений гемодинамики ретробульбарных артерий, регистрируемых при УЗИ, лежит патологическое влияние гипергликемии на сосудистую стенку, которое усиливается с ростом длительности заболевания [12]. Динамическое ультразвуковое наблюдение и интегральная оценка изменений гемодинамики ретробульбарных сосудов и зрительного нерва комплексно позволяют персонализировать подход к диагностике ДР. Преимуществом данного подхода в динамическом наблюдении является безопасность, неинвазивность, безболезненность и доступность использования у детей и подростков.

Продолжение исследований с увеличением количества наблюдений, сопоставление результатов ультразвуковой шкалы Oph-RADS с данными оптической когерентной томографии позволит более точно определить возможности УЗД в динамическом наблюдении нарушений кровоснабжения глаз и орбит у детей и подростков с СД 1 типа.

## Заключение

Интегральная ультразвуковая шкала Oph-RADS комплексно отражает изменения ретробульбарного кровотока у пациентов с СД 1 типа в детском и подростковом возрасте и позволяет объективизировать количественные данные ультразвуковой доплерографии.

**Участие авторов**

Фомина С.В. – написание статьи, сбор данных, анализ и интерпретация данных, оформление рукописи.

Самойлова Ю.Г., Завадовская В.Д. – разработка концепции и дизайна публикации, проверка интеллектуального содержания, окончательное утверждение рукописи для публикации.

Кошмелева М.В., Трифонова Е.И., Качанов Д.А., Зоркальцев М.А., Юн В.Э. – сбор данных, поиск литературы, проверка интеллектуального содержания.

**Authors' participation**

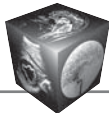
Fomina S.V. – article writing, data collection, data analysis and interpretation, manuscript preparation.

Samoilova I.G., Zavadovskaya V.D. – development of the concept and design of the publication, verification of intellectual content, final approval of the manuscript for publication.

Koshmeleva M.V., Trifonova E.I., Kachanov D.A., Zorkaltsev M.A., Yun V.E. – data collection, literature search, intellectual content check.

**Список литературы [References]**

- Дедов И.И., Шестакова М.В., Викулова О.К., Железнякова А.В., Исаков М.А., Серков А.А., Мокрышева Н.Г. Динамика эпидемиологических показателей сахарного диабета в Российской Федерации за период 2017–2021 гг.: Сборник тезисов IX (XXVIII) Национального диабетологического конгресса с международным участием "Сахарный диабет и ожирение – неинфекционные междисциплинарные пандемии XXI века", 05–08 сентября 2022 года. М., 2022. Dedov I.I., Shestakova M.V., Vikulova O.K., et al. Dynamics of epidemiological indicators of diabetes mellitus in the Russian Federation for the period 2017–2021: Collection of abstracts of the IX (XXVIII) National Diabetology Congress with international participation "Diabetes mellitus and obesity – non-infectious interdisciplinary pandemics of the 21st century", September 05–08, 2022. M., 2022. (In Russian)
- International Diabetes Federation. IDF Diabetes Atlas, 9th ed. Brussels, Belgium, 2019. Available at: <https://www.diabetesatlas.org>. Accessed October 3, 2020.
- Билецкая В.А., Липатов Д.В., Саяпина И.Ю., Фролов М.А., Сургуч В.К. Маркеры пролиферативной диабетической ретинопатии. *Офтальмология*. 2022; 19 (3): 557–564. <https://doi.org/10.18008/1816-5095-2022-3-557-564> Biletskaya V.A., Lipatov D.V., Sayapina I.Yu. et al. Markers of Proliferative Diabetic Retinopathy. *Ophthalmology in Russia*. 2022; 19 (3): 557–564. <https://doi.org/10.18008/1816-5095-2022-3-557-564> (In Russian)
- Crasto W., Patel V., Davies M.J., Khunti K. Prevention of Microvascular Complications of Diabetes. *Endocrinol. Metab. Clin. N. Am.* 2021; 50 (3): 431–455. <https://doi.org/10.1016/j.ecl.2021.05.005>
- Saeedi P., Petersohn I., Salpea P. et al.; IDF Diabetes Atlas Committee. Global and regional diabetes prevalence estimates for 2019 and projections for 2030 and 2045: Results from the International Diabetes Federation Diabetes Atlas, 9th ed. *Diabetes Res. Clin. Pract.* 2019; 157: 107843. <https://doi.org/10.1016/j.diabres.2019.107843>
- Демидова Т.Ю., Кожевников А.А. Диабетическая ретинопатия: история, современные подходы к ведению, перспективные взгляды на профилактику и лечение. *Сахарный диабет*. 2020; 23 (1): 95–105. <https://doi.org/10.14341/DM10273> Demidova T.Y., Kozhevnikov A.A. Diabetic retinopathy: history, modern approaches to management, prospective views of prevention and treatment. *Diabetes Mellitus*. 2020; 23 (1): 95–105. <https://doi.org/10.14341/DM10273> (In Russian)
- Скрининг на диабетическую ретинопатию: Повышение эффективности, максимальное увеличение пользы и минимизация вреда. Краткое руководство. Копенгаген: Европейское региональное бюро ВОЗ, 2021. Лицензия: CCBY-NC-SA3.0IGO. Diabetic retinopathy screening: a short guide: increase effectiveness, maximize benefits and minimize harm. Copenhagen: World Health Organization. Regional Office for Europe. (2021). License: CC BY-NC-SA 3.0 IGO (In Russian)
- Ультразвуковое исследование в офтальмологии: Руководство для врачей / Под ред. В.В. Нероева и Т.Н. Киселевой. 1-е изд. М.: Изд-во ИКАР, 2019. 324 с. Ultrasound examination in ophthalmology: A guide for doctors / Eds V.V. Neroeva and T.N. Kiseleva. 1st ed. M.: Publishing house ICAR, 2019. 324 p. (In Russian)
- Киселева Т.Н., Зайцев М.С., Рамазанова К.А., Луговкина К.В. Возможности цветового дуплексного сканирования в диагностике сосудистой патологии глаза. *Российский офтальмологический журнал*. 2018; 11 (3): 84–94. <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2018-11-3-84-94> Kiseleva T.N., Zaitsev M.S., Ramazanova K.A., Lugovkina K.V. Possibilities of color duplex imaging in the diagnosis of ocular vascular pathology. *Russian Ophthalmological Journal*. 2018; 11(3): 84–94. <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2018-11-3-84-94> (In Russian)
- Divya K., Kanagaraju V., Devanand B. et al. Evaluation of retrobulbar circulation in type 2 diabetic patients using color Doppler imaging. *Indian J. Ophthalmol.* 2020; 68 (6): 1108–1114. [https://doi.org/10.4103/ijo.IJO\\_1398\\_19](https://doi.org/10.4103/ijo.IJO_1398_19)
- Khatir M., Saxena S., Kumar M. et al. Resistive index of central retinal artery is a bioimaging biomarker for severity of diabetic retinopathy. *Int. J. Retina Vitreous*. 2019; 5: 38. <https://doi.org/10.1186/s40942-019-0189-4>
- Madhpuriya G., Gokhale S., Agrawal A. et al. Evaluation of Hemodynamic Changes in Retrobulbar Blood Vessels Using Color Doppler Imaging in Diabetic Patients. *Life (Basel)*. 2022; 12 (5): 629. <https://doi.org/10.3390/life12050629>
- Ozates S., Derinkuyu B.E., Elgin U. et al. Early Ophthalmic Artery Blood Flow Parameter Changes in Patients with Type 1 Diabetes Mellitus. *Beyoglu Eye J.* 2020; 5 (1): 17–21. <https://doi.org/10.14744/bej.2020.15238>
- Wang Q., Zeng N., Tang H. et al. Diabetic retinopathy risk prediction in patients with type 2 diabetes mellitus using a nomogram model. *Front Endocrinol. (Lausanne)*. 2022; 13: 993423. <https://doi.org/10.3389/fendo.2022.993423>
- Фомина С.В., Завадовская В.Д., Самойлова Ю.Г., Кошмелева М.В., Качанов Д.А., Трифонова Е.И., Зоркальцев М.А., Юн В.Э. Ультразвуковые показатели



кровотока глаза и орбиты при различной длительности сахарного диабета 1-го типа в детском и подростковом возрасте. *Сибирский журнал клинической и экспериментальной медицины*. 2024; 39 (1): 140–147. <https://doi.org/10.29001/2073-8552-2024-39-1-140-147>  
Fomina S.V., Zavadovskaya V.D., Samoylova I.G. et al. Ultrasound indicators of blood flow in the eyes and orbits at different durations of type 1 diabetes mellitus in childhood and adolescence. *Siberian Journal of Clinical and Experimental Medicine*. 2024; 39 (1): 140–147.

<https://doi.org/10.29001/2073-8552-2024-39-1-140-147> (In Russian)

16. Киселева Т.Н., Зайцев М.С., Луговкина К.В. Вопросы безопасности диагностического ультразвука в офтальмологии. *Офтальмология*. 2018; 15 (4): 47–454. <https://doi.org/10.18008/1816-5095-2018-4-447-454>  
Kiseleva T.N., Zaitsev M.S., Lugovkina K.V. The Safety of Diagnostic Ultrasound in Ophthalmology. *Ophthalmology in Russia*. 2018; 15 (4): 447–454. <https://doi.org/10.18008/1816-5095-2018-4-447-454> (In Russian)

**Для корреспонденции\***: Фомина Светлана Викторовна – e-mail: statfom@mail.ru

**Фомина Светлана Викторовна** – канд. мед. наук, доцент, заведующая отделением, врач ультразвуковой диагностики ФГБОУ ВО «Сибирский государственный медицинский университет» Минздрава России, Томск. <https://orcid.org/0000-0001-7517-3393>

**Самойлова Юлия Геннадьевна** – доктор мед. наук, профессор, заведующая кафедрой педиатрии с курсом эндокринологии ФГБОУ ВО «Сибирский государственный медицинский университет» Минздрава России, Томск. <https://orcid.org/0000-0002-2667-4842>

**Завадовская Вера Дмитриевна** – доктор мед. наук, профессор, и.о. заведующей кафедрой лучевой диагностики и лучевой терапии ФГБОУ ВО «Сибирский государственный медицинский университет» Минздрава России, Томск. <https://orcid.org/0000-0001-6231-7650>. E-mail: Wdzav@mail.ru

**Кошмелева Марина Владиславовна** – канд. мед. наук, доцент, доцент кафедры педиатрии с курсом эндокринологии ФГБОУ ВО «Сибирский государственный медицинский университет» Минздрава России, Томск. <https://orcid.org/0000-0001-8142-1226>

**Качанов Дмитрий Андреевич** – лаборант-исследователь кафедры педиатрии с курсом эндокринологии ФГБОУ ВО «Сибирский государственный медицинский университет» Минздрава России, Томск. <https://orcid.org/0000-0002-6519-8906>

**Трифоновна Екатерина Ивановна** – ассистент кафедры педиатрии с курсом эндокринологии ФГБОУ ВО «Сибирский государственный медицинский университет» Минздрава России, Томск. <https://orcid.org/0000-0002-2825-5035>

**Зоркальцев Максим Александрович** – доктор мед. наук, доцент кафедры лучевой диагностики и лучевой терапии ФГБОУ ВО «Сибирский государственный медицинский университет» Минздрава России, Томск. <https://orcid.org/0000-0003-0025-2147>. E-mail: Zorkaltsev@mail.ru

**Юн Вера Эдуардовна** – ассистент кафедры педиатрии с курсом эндокринологии ФГБОУ ВО «Сибирский государственный медицинский университет» Минздрава России, Томск. <https://orcid.org/0000-0002-9127-8619>

**Contact\***: Svetlana V. Fomina – e-mail: statfom@mail.ru

**Svetlana V. Fomina** – Cand. of Sci. (Med.), Associate Professor of the Department of Radiation Diagnostics and Radiation Therapy, Head of the Department – Doctor of Ultrasound Diagnostics, Siberian State Medical University, Tomsk. <https://orcid.org/0000-0001-7517-3393>

**Iuliia G. Samoilova** – Doct. of Sci. (Med.), Professor, Head Department of Pediatrics with a course of endocrinology, Siberian State Medical University, Tomsk. <https://orcid.org/0000-0002-2667-4842>

**Vera D. Zavadovskaya** – MD, Doct. of Sci. (Med.), Professor, Head of the Radiology and Radiotherapy Department, Siberian State Medical University, Tomsk. <https://orcid.org/0000-0001-6231-7650>. E-mail: Wdzav@mail.ru

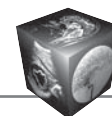
**Marina V. Koshmeleva** – Cand. of Sci. (Med.), Associate Professor of the Department of Pediatrics with a Course of Endocrinology, Siberian State Medical University, Tomsk. <https://orcid.org/0000-0001-8142-1226>

**Dmitriy A. Kachanov** – Laboratory researcher at the Department of Pediatrics with a course of endocrinology, Siberian State Medical University, Tomsk. <https://orcid.org/0000-0002-6519-8906>

**Ekaterina I. Trifonova** – Assistant of the department of pediatrics with a course of endocrinology, Siberian State Medical University, Tomsk. <https://orcid.org/0000-0002-2825-5035>

**Maxim A. Zorkaltsev** – MD, Doct. of Sci. (Med.), Associate Professor of the Radiology and Radiotherapy Department, Siberian State Medical University, Tomsk. <https://orcid.org/0000-0003-0025-2147>. E-mail: Zorkaltsev@mail.ru

**Vera E. Yun** – Assistant of the department of pediatrics with a course of endocrinology, Siberian State Medical University, Tomsk. <https://orcid.org/0000-0002-9127-8619>



ISSN 1607-0763 (Print); ISSN 2408-9516 (Online)

<https://doi.org/10.24835/1607-0763-1512>

## Крутизна дисперсии скорости сдвиговых волн (SWDS) – новый параметр ультразвуковой диагностики воспалительных изменений в печени

© Зыкин Б.И., Ионова Е.А., Аносова Т.А. \*

ФГБУ «Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна» ФМБА России; 123098 Москва, ул. Живописная, д. 46, Российская Федерация

**Введение.** Одной из наиболее актуальных проблем ультразвуковой сдвиговой эластометрии печени является отсутствие отчетливых цифровых дифференциально-диагностических критериев наличия и выраженности фиброза при воспалении.

**Цель исследования:** оценить возможность нового ультразвукового параметра – крутизны дисперсии скорости сдвиговых волн (shear wave dispersion slope, SWDS) в решении этой проблемы.

**Материал и методы.** Обследовано 166 пациентов с различной патологией печени. В зависимости от отсутствия или наличия фиброза, а также воспалительных изменений в печени (по данным биопсии и серологических исследований крови) обследованные разделены на 3 группы. Контрольная группа состояла из 10 здоровых доноров. Измерения скорости сдвиговых волн (SWS), крутизны дисперсии скорости сдвиговых волн (SWDS) и оценку аттенуации ультразвука (ATI) в печени проводили на ультразвуковой диагностической системе Canon Medical Aplio i800 (Токио, Япония) с помощью стандартного конвексного преобразователя 1–8 МГц.

**Результаты.** Показатели SWS, SWDS и ATI (медиана и 95% ДИ) в контрольной группе составили 1,2 (1,1–1,6) м/с, 10,1 (9,7–14,3) м/с/кГц и 0,54 (0,41–0,63) дБ/см/МГц соответственно. Исследование основной группы показало, что между SWS и SWDS существует тесная корреляция (Spearman's rho = 0,74). При этом у пациентов группы с воспалением имели место достоверно ( $p < 0,01$ ) более высокие значения SWDS по сравнению с контрольной группой и группой без воспаления –16,4 (15,3–17,9) м/с/кГц против 10,1 (1,7–14,3) м/с/кГц и 12,7 (12,1–14,3) м/с/кГц соответственно. У больных подгруппы с фиброзом, но без воспаления, также было отмечено достоверное ( $p < 0,01$ ) повышение SWDS с 12,0 (11,4–12,8) м/с/кГц при F0–1 до 16,5 (12,9–20,3) м/с/кГц при F3–4 по METABIP.

**Заключение.** Использование абсолютных значений SWDS не способствовало достижению цели настоящего исследования – обнаружению отчетливых критериев дифференциальной диагностики наличия и выраженности фиброза печени у больных с гепатитом. Тем не менее результаты исследования дают основание сделать достаточно уверенное заключение о том, что оценка взаимоотношений SWDS и SWS с помощью формулы бинарной логистической регрессии ( $\text{logit}(p) = 0,4152 \text{ SWDS (м/с/кГц)} - 0,1344 \text{ SWS (м/с)} - 6,5115$ ) может стать ценным дополнительным методом ультразвуковой диагностики воспалительных изменений в печени.

**Ключевые слова:** фиброз печени; воспаление печени; скорость сдвиговых волн (SWS) в печени; дисперсия скорости сдвиговых волн (SWDS) в печени

**Авторы подтверждают отсутствие конфликтов интересов.**

**Для цитирования:** Зыкин Б.И., Ионова Е.А., Аносова Т.А. Крутизна дисперсии скорости сдвиговых волн (SWDS) – новый параметр ультразвуковой диагностики воспалительных изменений в печени. *Медицинская визуализация*. 2025; 29 (1): 41–50. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1512>

**Поступила в редакцию:** 04.11.2024.

**Принята к печати:** 29.11.2024.

**Опубликована online:** 14.02.2025.



# Shear-Wave Dispersion Slope (SWDS) is a new ultrasound parameter to detect liver inflammation

© Boris I. Zykin, Elena A. Ionova, Tatyana A. Anosova\*

Federal Medical Biophysical Center named after A.I. Burnazyan Russia's Federal Medical-Biological Agency;  
46, Zhivopishaya str., Moscow 123098, Russian Federation

**Background:** one of the most pressing problems of ultrasound shear wave elastometry of the liver is the lack of distinct digital differential diagnostic criteria for the presence and severity of fibrosis in inflammation.

**Purpose.** To evaluate the possibility of a new ultrasonic parameter – the shear wave dispersion slope (SWDS) in solving this problem.

**Materials and methods.** 156 patients with various liver pathologies were examined. Depending on the absence or presence of fibrosis, as well as inflammatory changes in the liver (according to biopsy and serological blood tests), the examined patients were divided into three groups. The control group consisted of 10 healthy donors. Measurements of the shear wave velocity (SWS), shear wave dispersion slope (SWDS) and the assessment of ultrasound attenuation (ATI) in the liver were performed using the Canon Medical Aplio i800 ultrasound diagnostic system (Tokyo, Japan) using a standard convex transducer.

**Results.** The indicators of SWS, SWDS and ATI (Median and 95% CI) in the control group were Me 1.2 (95% CI 1.1–1.6) m/s, Me 10.1 (95% CI 9.7–14.3) m/s/kHz and Me 0.54 (95% CI 0.41–0.63) dB/cm/MHz, respectively. The study of the main group showed that there is a close correlation between SWS and SWDS (Spearman's  $\rho = 0.74$ ). At the same time, patients in the subgroup with inflammation had significantly ( $p < 0.01$ ) higher SWDS values compared with the control group and the subgroup without inflammation – Me 16.4 (95% CI 15.3–17.9) m/s/kHz versus Me 10.1 (95% CI 9.7–14.3) m/s/kHz and Me 12.7 (95% CI 12.1–14.3) m/s/kHz. In patients of the subgroup with fibrosis, but without inflammation, there was also a significant ( $p < 0.01$ ) increase in SWDS from Me 12.0 (95% CI 11.4–12.8) m/s/kHz at F0–1 to Me 16.5 (95% CI 12.9–20.3) m/s/kHz at F3–4 METAVIR.

**Conclusion.** The use of absolute SWDS values did not contribute to the achievement of the purpose of this study – the detection of criteria for the differential diagnosis of the presence and severity of liver fibrosis in patients with hepatitis. Nevertheless, the results of the study provide grounds for making a fairly confident conclusion that the assessment of the relationship between SWDS and SWS using the binary logistic regression formula ( $\text{logit}(p) = 0,4152 \text{ SWDS (м/с/кГц)} - 0,1344 \text{ SWS (м/с)} - 6,5115$ ) can become a valuable additional method for ultrasound diagnostics of inflammatory changes in the liver.

**Keywords:** liver fibrosis; inflammation of the liver; the velocity of shear waves (SWS) in the liver; the dispersion slope of shear wave velocity (SWDS) in the liver

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

**For citation:** Zykin B.I., Ionova E.A., Anosova T.A. Shear-Wave Dispersion Slope (SWDS) is a new ultrasound parameter to detect liver inflammation. *Medical Visualization*. 2025; 29 (1): 41–50.  
<https://doi.org/10.24835/1607-0763-1512>

**Received:** 04.11.2024.

**Accepted for publication:** 29.11.2024.

**Published online:** 14.02.2025.

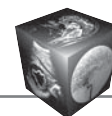
## Введение

Относительно недавно в ультразвуковой эластографии появился новый диагностический параметр – дисперсия скорости сдвиговых волн (shear wave dispersion, SWD) [1–3]. Эта новая методика стала продолжением развития метода сдвиговой эластографии, уже получившей достаточное распространение [4], однако она в определенной степени изменила наше представление о биофизической основе метода.

Большинству из тех, кто занимается ультразвуковой сдвиговой эластометрией печени, хорошо знакома формула, в которой скорость сдвиговых

волн (SWS) определяется только модулем сдвига при постоянстве плотности (рис. 1а). Но, возможно, не все специалисты отчетливо представляют, что эта формула “работает” только в упругих тканях и что печень к числу таковых не относится. На самом деле ткань печени не упругая, а вязкоупругая. Поэтому SWS в печени должна оцениваться с помощью значительно более сложной формулы (рис. 1б), в которой скорость зависит не только от модуля сдвига и плотности, но и от собственной частоты и вязкости [2, 5].

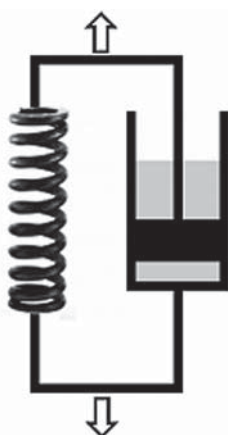
Из этого следует, что показатель упругости, который выводится на экране ультразвуковых



$$\text{а) } C \approx \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad \text{б) } C = \sqrt{\frac{2(\mu^2 + \omega^2 \cdot \eta^2)}{\rho(\mu + \sqrt{\mu^2 + \omega^2 \cdot \eta^2})}}$$

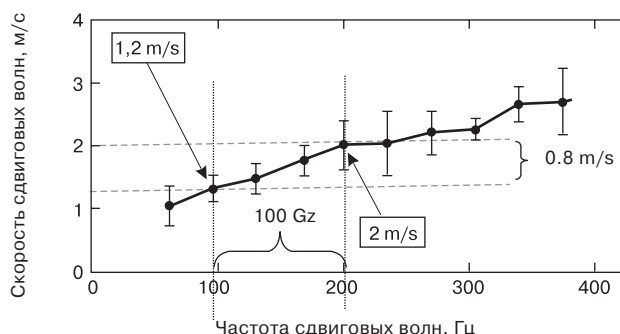
**Рис. 1.** Формулы оценки скорости (C) сдвиговых волн. а – упрощенная; б – реальная, в которых  $\mu$  – модуль сдвига,  $\rho$  – плотность,  $\omega$  – частота СВ и  $\eta$  – вязкость среды (по Zheng Y. и соавт., 2013 [5]).

**Fig. 1.** Formulas for estimating the velocity (C) of shear waves. а – simplified, б – real, in which  $\mu$  is the shear modulus,  $\rho$  – the density,  $\omega$  – the frequency of shear waves and  $\eta$  – the viscosity of the medium (according to Zheng Y. et al., 2013 [5]).



**Рис. 2.** Принципиальная схема модели Кельвина – Фогта (по Кристенсен Р., 1974 [6]).

**Fig. 2.** A schematic diagram of the Kelvin-Voigt model (according to Christensen R., 1974 [6]).



**Рис. 3.** Пример зависимости скорости сдвиговых волн в печени от ее собственной частоты (модиф. Deffieux T. и соавт., 2009 [9]).

**Fig. 3.** An example is the dependence of the frequency of shear wave in the liver on its own frequency (modif. Deffieux T. et al., 2009 [9]).

диагностических систем, необходимо рассматривать как сумму оценки двух биофизических процессов – упругости и вязкости, сочетанной работы пружины и амортизатора, как в модели, которая носит имя Кельвина–Фогта [6] (рис. 2).

В этой модели по законам пружины (т.е. по законам упругости) работает статическая упругость соединительнотканного каркаса печени, а по законам амортизатора (по законам вязкости) живет динамическая упругость, определяемая давлением воды в тканях [7]. С клинической точки зрения статическая отчетливо связана с фиброзом, а динамическая – с воспалительным отеком тканей и/или наличием венозного стаза.

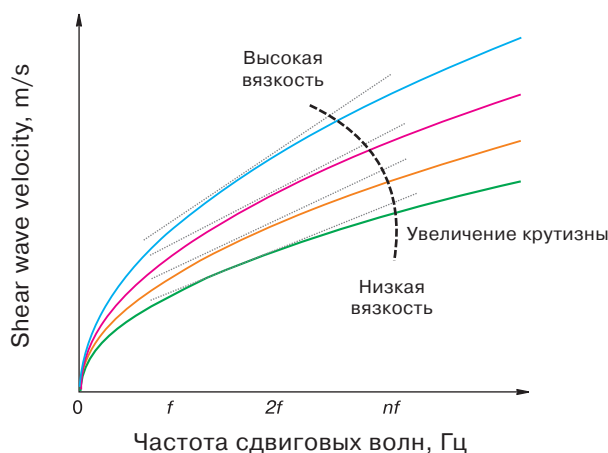
Наличие этих, очень часто одновременно протекающих патологических процессов создает значительную проблему в дифференциальной диагностике фиброза и воспаления. Добиться объективной оценки наличия и выраженности фиброза печени в условиях воспаления и/или венозного застоя до последнего времени можно было только с помощью редукции влияния последних (т.е. вязкости) после эффективной терапии [8].

Именно поэтому исследователи возлагают большие надежды на новый ультразвуковой эластографический параметр оценки вязкости – крутизну дисперсии скорости сдвиговых волн (shear wave dispersion slope, SWDS), измеряемую в м/с на 1 кГц [2].

Физически дисперсия скорости представляет собой зависимость скорости сдвиговой волны от собственной частоты. На рис. 3, например, показано, что при частоте 100 Гц SWS составляет 1,2 м/с, а при частоте 200 Гц – уже 2 м/с. Различие скоростей в 0,8 м/с и есть дисперсия, а крутизна дисперсии в этом примере – 0,8 м/с на 100 Гц (или, в пересчете, 8 м/с на 1 кГц). Благодаря широкополосной технологии подобный анализ производится многократно, n-раз, после чего высчитывается и выводится на экран среднее значение крутизны дисперсии в точке измерения.

Однако самое интересное (с точки зрения изучаемой в настоящем исследовании проблемы) заключается в том, что дисперсия и ее крутизна зависят еще и от вязкости: чем выше вязкость – тем выше значения крутизны дисперсии скорости сдвиговых волн (рис. 4).

Ряд авторов уже нашли отчетливую взаимосвязь между дисперсией SWS и выраженностью фиброза и воспалительных изменений в печени [3, 11–13]. Тем не менее есть публикации [11, 14], в которых SWDS не связывалась с выраженностью фиброза (Spearman's rho = 0,08) или воспалением (Pearson's correlation 0,27), а ее использование



**Рис. 4.** Вариабельность скорости сдвиговых волн и ее дисперсии в зависимости от собственной частоты и вязкости среды (модиф. Garcovich M. и соавт., 2023) [10].

**Fig. 4.** Variability of shear wave velocity and its dispersion depending on the own frequency and viscosity of the medium (modif. Garcovich M. et al., 2023) [10].

в итоге никак не улучшало дифференциальную диагностику фиброза и воспаления печени.

**Цель исследования:** оценить возможности SWDS в дифференциальной диагностике фиброзных и воспалительных поражений печени.

## Материал и методы

### Общая характеристика обследованных

Все пациенты обследованы в отделении ультразвуковой диагностики ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. Бурназяна ФМБА России в период с января по май 2024 г. Общее число обследованных составило 166 человек.

Основная группа ( $n = 156$ ) была представлена больными с циррозом печени, ожидавшими пересадку печени ( $n = 29$ ), пациентами после пересадки ( $n = 91$ ) и 36 больными с различной патологией печени (токсический гепатит, гепатит В, гепатит С, болезнь Вильсона–Коновалова). Из исследования были исключены пациенты с портальной гипертензией и выраженным стеатозом печени (показатель весоростового индекса в основной группе (медиана и 95% ДИ) составил 26, 0 (24,8–27,1). Не учитывались также возрастные и гендерные различия.

Больные с патологией печени были разделены в зависимости от отсутствия или наличия воспалительных изменений (по данным серологических исследований крови, табл. 1) на 2 группы. В 1-ю группу было включено 92 больных, во 2-ю – 64.

Из 1-й группы была выделена подгруппа с верифицированным фиброзом, состоявшая из 39 больных, у которых стадия фиброза была определена по результатам биопсии. Данные биохимического исследования крови в подгруппе представлены в табл. 1.

В контрольную группу включено 10 здоровых доноров (6 мужчин и 4 женщины) в возрасте от 19 до 60 лет перед родственной пересадкой. Весоростовой индекс в контрольной группе (медиана и 95% ДИ) составил 24,1 (22,8–25,1). Данные биохимического исследования крови доноров представлены в табл. 1.

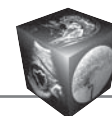
### Методы исследования печени

У всех 166 пациентов проведены измерения скорости (SWS) и крутизны дисперсии скорости сдвиговых волн (SWDS) в печени, а также показателя затухания ультразвука (ATI). Все исследования выполнены с использованием стандартного конвексного преобразователя 1–8 МГц на ультразвуковой диагностической системе Canon Medical Aplio i800 (Токио, Япония), оснащенной пакетом прикладных программ исследования печени (Liver Package).

Измерения скорости (SWS) проводились в соответствии с последним протоколом проведения сдвиговой эластографии печени, рекомендованным группой ведущих специалистов [15]. Исследование выполнялось строго натошак в положении пациента лежа на спине из интеркостального доступа в пятом–седьмом межреберье. Окно эластографии устанавливалось в бессосудистой зоне паренхимы правой доли на глубине около 5 см от апертуры преобразователя, вне зоны артефактов. Фиксацию изображения проводили при задержке пациентом дыхания в фазу неглубокого выдоха при условии качественно получаемой эластограммы.

Одномоментно на экране получали 4 изображения одной и той же области печени (рис. 5), на которых отображались: слева сверху (рис. 5а) – цветовое картирование скоростей сдвиговых волн; справа сверху (рис. 5б) – карта распространения фронта сдвиговых волн в режиме “propagation”; слева внизу (рис. 5в) – эхограмма печени; справа внизу (рис. 5г) – цветовое картирование дисперсии скоростей сдвиговых волн (рис. 5г).

На полученной эластограмме проводили только одно измерение скорости и дисперсии скорости сдвиговых волн. Регистрировалась медиана 10 измерений. Результаты измерений считались валидными, если отношение IQR/med не превышало 15%.

**Таблица 1.** Медиана и биохимические показатели крови в обследованных группах**Table 1.** Median and 95% CI of biochemical blood parameters in the examined groups

| Биохимические показатели<br>Biochemical parameters     | 1-я группа<br>group 1<br>(n = 92) | 2-я группа<br>group 2<br>(n = 64) | Подгруппа с фиброзом<br>Subgroup with fibrosis<br>(n = 39) | Контрольная группа<br>Control group<br>(n = 10) |
|--------------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
|                                                        | Me<br>(95%CI )                    |                                   |                                                            |                                                 |
| Альбумин, г/л<br>Albumin, g/l                          | 44.7<br>(43.6–46)                 | 40.8<br>(39.1–42.4)               | 44.1<br>41–45.8)                                           | 46.9<br>(44.8–49.5)                             |
| Щелочная фосфатаза, Е/л<br>Alkaline phosphatase, E/L   | 96.1<br>(89.4–106.0)              | 212.2<br>(186.1–313.3)            | 106<br>(90.4–124.9)                                        | 69.9<br>(43.2–102.6)                            |
| Билирубин общий, мкмоль/л<br>Total bilirubin, mmol/l   | 11.8<br>(10.2–14.3)               | 34.3<br>(21.6–43.9)               | 15.3<br>(10.7–24.1)                                        | 12.6<br>(9.9–14.6)                              |
| Билирубин прямой, мкмоль/л<br>Direct bilirubin, mmol/L | 4.6<br>(3.8–5.6)                  | 14.5<br>(10.5–31.2)               | 5.8<br>(4.2–8.1)                                           | 4.7<br>(3.5–7.2)                                |
| АЛТ, Е/л<br>ALT, E/L                                   | 44.7<br>(43.6–46.3)               | 78.3<br>(60.3–107.5)              | 20.5<br>(15.8–23.6)                                        | 12.9<br>(7.6–20.7)                              |
| АСТ, Е/л<br>AST, E/L                                   | 22.4<br>(20.4–25.5)               | 62.8<br>(53.9–88.8)               | 25.1<br>(20.8–29.6)                                        | 15.5<br>(12.4–24.5)                             |
| С-реактивный белок, мг/л<br>C-reactive protein, mg/l   | 3.1<br>(2.1–4.2)                  | 6.5<br>(3.6–10.7)                 | 3.5<br>(1.9–6.3)                                           | 1.4<br>(0.3–4.1)                                |
| ГГТП, Е/л<br>Gamma-GT, E/L                             | 27.0<br>(23.2–32.0)               | 251.1<br>(75.8–378.3)             | 28<br>(23–35.6)                                            | 23.5<br>(12.8–50.1)                             |

*Примечание.* 1. Различие между контрольной группой и группой 2: альбумин  $p < 0,01$ ; щелочная фосфатаза  $p < 0,01$ ; билирубин (общий)  $p < 0,01$ ; билирубин (прямой)  $p < 0,05$ ; АЛТ  $p < 0,01$ ; АСТ  $p < 0,01$ ; гамма-ГТП  $p < 0,01$ ; С-реактивный белок  $p < 0,01$ .

2. Различие между группами 1 и 2: альбумин  $p < 0,01$ ; щелочная фосфатаза  $p < 0,01$ ; билирубин (общий)  $p < 0,01$ ; билирубин (прямой)  $p < 0,01$ ; АЛТ  $p < 0,01$ ; АСТ  $p < 0,01$ ; гамма-ГТП  $p < 0,01$ ; С-реактивный белок  $p < 0,05$ .

*Notes.* 1. Difference between the control group and group 2: albumin  $p < 0.01$ ; alkaline phosphatase  $p < 0.01$ ; bilirubin (total)  $p < 0.01$ ; bilirubin (direct)  $p < 0.05$ ; ALT  $p < 0.001$ ; AST  $p < 0.01$ ; Gamma-GT  $p < 0.01$ ; C-reactive protein  $p < 0.01$ .

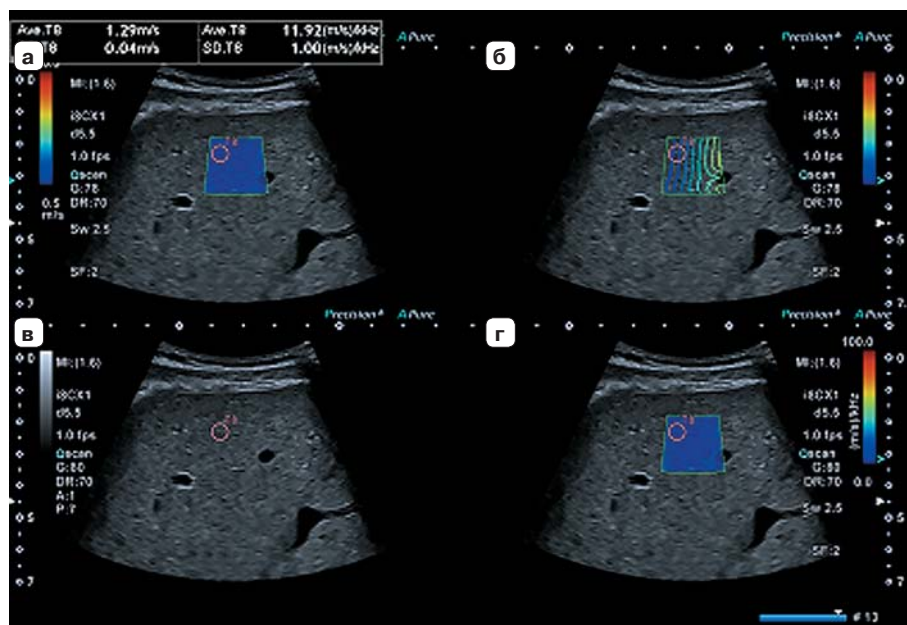
2. Difference between groups 1 and 2: albumin  $p < 0.01$ ; alkaline phosphatase  $p < 0.01$ ; bilirubin (total)  $p < 0.01$ ; bilirubin (direct)  $p < 0.01$ ; ALT  $p < 0.01$ ; AST  $p < 0.01$ ; Gamma-GT  $p < 0.01$ ; C-reactive protein  $p < 0.05$ .

Оценку коэффициента поглощения (аттенуации) ультразвука (АТИ) проводили в соответствии с рекомендациями фирмы-производителя с определением медианы 5 измерений. Для получения корректных данных окно измерения поглощения ультразвуковых волн (в дБ/см/МГц) располагали в зоне цветовой стеатогаммы, избегая артефактов и минимизируя попадание сосудистых структур, ориентируясь на профиль интенсивности и значения коэффициента детерминации  $R^2 (\geq 0,9)$  (рис. 6).

#### Статистические инструменты

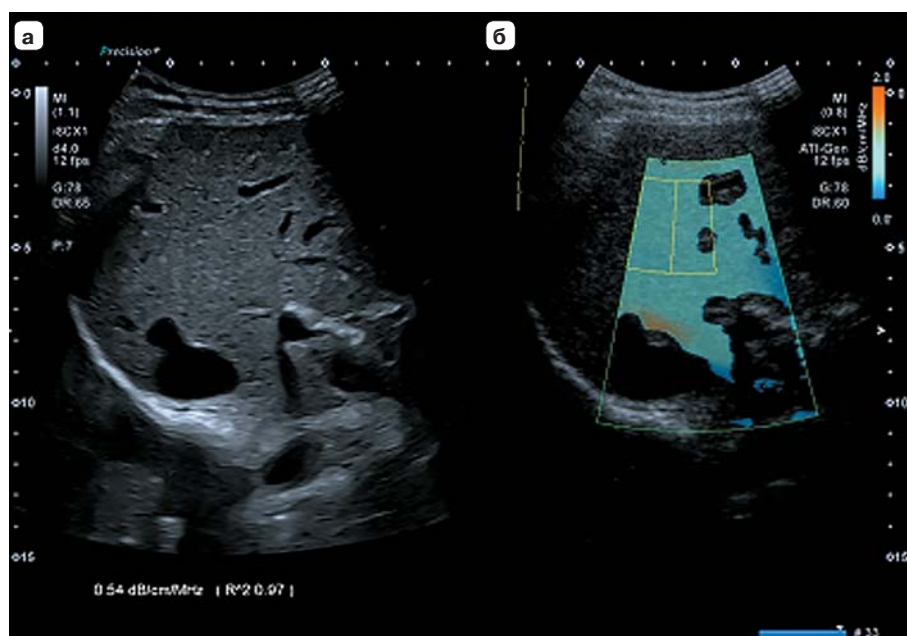
Анализ полученных данных осуществлялся с использованием программы MedCalc (v.7.4.4.1,

Mariakerke, Бельгия). Общий статистический анализ проводили по методу Колмогорова–Смирнова. Поскольку предварительный анализ показал, что в некоторых группах имеет место неправильное распределение, в качестве основного инструмента была принята непараметрическая статистика с использованием медианы и 95% ДИ. Для сравнения групп использовали тест Манна–Уитни (U-test Mann–Whitney, unpaired data). Значимым считалось  $p < 0,05$ . При проверке тесноты связей между исследуемыми параметрами использовался коэффициент ранговой корреляции по Спирмену (Spearman's rho). Для изучения взаимоотношения показателей SWE и SWDS был применен регрессионный анализ.



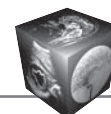
**Рис. 5.** Пример мультипараметрического эластографического изображения печени. **а** – цветовое картирование скоростей сдвиговых волн; **б** – карта распространения фронта сдвиговых волн в режиме “propagation”; **в** – эхограмма печени; **г** – цветовое картирование дисперсии скоростей сдвиговых волн.

**Fig. 5.** Example of multiparametric elastographic image of the liver. **a** – color mapping of shear wave velocities; **b** – map of the propagation of the shear wave front in the “propagation” mode; **v** – echogram of the liver; **г** – color mapping of the dispersion of shear wave velocities.



**Рис. 6.** Пример ультразвуковой стеатометрии печени. **а** – эхограмма печени; **б** – цветовая стеатограмма с окном измерения поглощения ультразвуковых волн.

**Fig. 6.** Example of ultrasound steatometry of the liver. **a** – echogram of the liver; **б** – color steatogram with a window for measuring the attenuation of ultrasound waves.

**Таблица 2.** Показатели SWS, SWDS и ATI в исследуемых группах**Table 2.** SWS, SWDS and ATI indices in the examined groups

| Показатели<br>Indices                                                                                           | 1-я группа<br>Group 1<br>(n = 92) | 2-я группа<br>Group 2<br>(n = 64) | Подгруппа с фиброзом<br>Subgroup with fibrosis<br>(n = 39) |                     | Контрольная<br>группа<br>Control group<br>(n = 10) |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------------------|---------------------|----------------------------------------------------|
|                                                                                                                 |                                   |                                   | F0–1<br>(n = 27)                                           | F3–4<br>(n = 12)    |                                                    |
| Me<br>(95%CI )                                                                                                  |                                   |                                   |                                                            |                     |                                                    |
| Скорость сдвиговых волн (SWS), м/с<br>Shear wave velocity (SWS), m/s                                            | 1.4<br>(1.3–1.5)                  | 1.8<br>(1.6–2.0)                  | 1.3<br>(1.2–1.4)                                           | 2.1<br>(1.7–3.0)    | 1.2<br>(1.1–1.6)                                   |
| Крутизна дисперсии скорости<br>сдвиговых волн (SWDS), м/с/кГц<br>Shear wave dispersion slope (SWDS),<br>m/s/kHz | 12.7<br>(12.1–14.3)               | 16.4<br>(15.3–17.9)               | 12.0<br>(11.4–12.8)                                        | 16.5<br>(12.9–20.3) | 10.1<br>(9.7–14.3)                                 |
| Коэффициент поглощения<br>ультразвука (ATI), дБ/см/МГц<br>Ultrasound Absorption Index (ATI),<br>dB/cm/MHz       | 0.57<br>(0.54–0.59)               | 0.54<br>(0.52–0.56)               | 0.57<br>(0.52–0.61)                                        | 0.58<br>(0.54–0.65) | 0.54<br>(0.41–0.63)                                |

**Примечание.**

- 1) различие SWS между контрольной группой и группой 1:  $p < 0,01$
- 2) различие SWS между контрольной группой и группой 2:  $p < 0,001$
- 3) различие SWS между группами 1 и 2:  $p < 0,01$
- 4) различие SWS между группами F0–1 и F3–4:  $p < 0,01$
- 5) различие SWS между контрольной группой и подгруппой с фиброзом (F0–1):  $p < 0,01$
- 6) различие SWS между контрольной группой и подгруппой с фиброзом (F3–4):  $p < 0,01$
- 7) различие SWDS между контрольной группой и группой 1:  $p < 0,01$
- 8) различие SWDS между контрольной группой и группой 2:  $p < 0,001$
- 9) различие SWDS между группами 1 и 2:  $p < 0,01$
- 10) различие SWDS между подгруппами F0–1 и F3–4:  $p < 0,01$
- 11) различие SWDS между контрольной группой и подгруппой с фиброзом (F0–1):  $p < 0,01$
- 12) различие SWDS между контрольной группой и подгруппой с фиброзом (F3–4):  $p < 0,01$
- 13) различие ATI между контрольной группой и группой 1:  $p > 0,05$
- 14) различие ATI между контрольной группой и группой 2:  $p > 0,05$
- 15) различие ATI между группами 1 и 2:  $p > 0,05$
- 16) различие ATI между подгруппами F0–1 и F3–4:  $p > 0,05$
- 17) различие ATI между контрольной группой и подгруппой с фиброзом (F0–1):  $p > 0,05$
- 18) различие ATI между контрольной группой и подгруппой с фиброзом (F3–4):  $p > 0,05$

**Notes.**

- 1) difference between SWS control group and group 1:  $p < 0.001$
- 2) difference between SWS control group and group 2:  $p < 0.001$
- 3) difference between SWS groups 1 and 2:  $p < 0.001$
- 4) difference between SWS subgroups F0–1 and F3–4:  $p < 0.001$
- 5) difference between SWS control group and subgroup F0–1:  $p < 0.01$
- 6) difference between SWS control group and subgroup F3–4:  $p < 0.001$
- 7) difference between SWDS control group and group 1:  $p < 0.001$
- 8) difference between SWDS control group and group 2:  $p < 0.001$
- 9) difference between SWDS groups 1 and 2:  $p < 0.001$
- 10) difference between SWDS subgroups F0–1 and F3–4:  $p < 0.001$
- 11) difference between SWDS control group and subgroup F0–1:  $p < 0.01$
- 12) difference between SWDS control group and subgroup F3–4:  $p < 0.001$
- 13) difference between ATI control group and group 1:  $p > 0.05$
- 14) difference between ATI control group and group 2:  $p > 0.05$
- 15) difference between ATI groups 1 and 2:  $p > 0.05$
- 16) difference between ATI subgroups F0–1 and F3–4:  $p > 0.05$
- 17) difference between ATI control group and subgroup F0–1:  $p > 0.05$
- 18) difference between ATI control group and subgroup F3–4:  $p > 0.05$



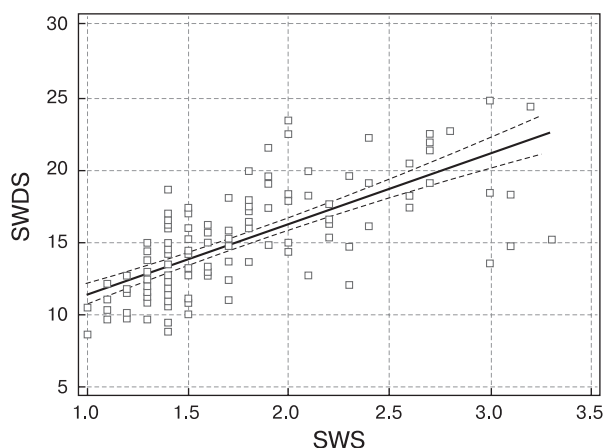
## Результаты исследования

Результаты исследования в контрольной и основной группах представлены в табл. 2. Эти результаты показывают, что между показателями SWS и SWDS во всех группах существует тесная взаимосвязь (Spearman's rho = 0,74).

На рис. 7 представлен график (с линией регрессии) полученных данных, которая отчетливо демонстрирует эту положительную корреляцию. Однако обращает на себя внимание, что при одинаковых значениях скорости показатели крутизны дисперсии заметно, а иногда даже значительно разбросаны выше или ниже линии регрессии. Очевидно, что обследованные пациенты представляют собой очень сложную гетерогенную выборку с самым различным уровнем фиброза и воспаления. Поэтому для того чтобы выяснить причину подобного разброса, потребовалось проведение раздельного селективного анализа связей SWDS с воспалением и фиброзом.

### Оценка влияния воспаления на SWDS

Первое селективное исследование показало, что в основной группе между показателем SWDS и наличием воспаления отмечена заметная положительная корреляция (Spearman's rho = 0,49). При этом у пациентов 2-й группы имели место достоверно ( $p < 0,01$  по Mann-Whitney) более высокие значения медианы SWDS по сравнению с контрольной и 1-й группой – 16,4 (15,3–17,9) м/с/кГц против 10,1 (9,7–14,3) м/с/кГц и 12,7 (12,1–14,3) м/с/кГц соответственно. Это указывает на то, что не только увеличение скорости, но и наличие воспаления увеличивает крутизну дисперсии скорости сдвиговых волн.



**Рис. 7.** График взаимоотношений SWS и SWDS в основной группе.

**Fig. 7.** A graph of the relationship between SWS and SWDS in the main group.

Необходимо добавить, что коэффициенты поглощения ультразвука (ATI), составившие в 1-й и 2-й группах 0,57 (0,54–0,59) дБ/см/МГц и 0,54 (0,52–0,56) соответственно, не отличались от нормы ( $p = 0,12$  и  $p = 0,93$  соответственно), что позволило исключить потенциальное влияние стеатоза на результат сравнения показателей SWDS.

### Оценка влияния фиброза на SWDS

Второе селективное исследование показало, что между выраженностью фиброза и показателем SWDS также существует заметная положительная взаимосвязь (Spearman's rho = 0,57). При этом у больных в подгруппе с фиброзом было отмечено достоверное ( $p < 0,01$ ) повышение медианы SWDS с 12,0 (11,4–12,8) м/с/кГц при F0–1 до 16,5 (12,9–20,3) м/с/кГц при F3–4 по METABIR. Это подтверждает тот факт, что наличие фиброза также увеличивает крутизну дисперсии скорости сдвиговых волн.

Коэффициенты поглощения ультразвука (ATI) в подгруппе с фиброзом незначительно варьировали – от 0,57 (0,52–0,61) дБ/см/МГц до 0,58 (0,52–0,56) дБ/см/МГц. Оба показателя не различались между собой и не отличались от нормы ( $p > 0,05$ ), что также позволило исключить возможное влияние стеатоза на сравнение результатов оценки SWDS у больных с фиброзом.

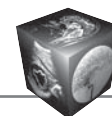
## Обсуждение

Результаты нашего исследования вполне согласуются с современными данными литературы. Нормативные значения медианы SWDS контрольной группы находятся в пределах от 10 до 12 м/с/кГц и сопоставимы с результатами, опубликованными рядом авторов [1, 3, 11, 12, 16–18].

В наших исследованиях (Spearman's rho 0,74), как и в работе K. Wang и соавт. [11] (Spearman's rho 0,84), отмечается тесная связь между SWS и SWDS.

Многие авторы, как и мы, отметили рост SWDS у больных с воспалительными изменениями в печени, хотя представленные результаты отличаются значительным разбросом полученных цифровых значений. Так, по одним данным [13] выраженное воспаление начинается с 19,7 м/с/кГц, а по другим [16] – с 11,6 м/с/кГц. В нашем исследовании у больных с серологическими признаками воспаления медиана SWDS составила 16,4 м/с/кГц, тогда как при отсутствии воспаления – 12,7 м/с/кГц ( $p < 0,01$ ).

Не было существенных различий и по результатам обследования больных с фиброзом печени. В целом ряде работ [3, 11, 12, 19] показатели SWDS с заметной высокой корреляцией (Pearson's correlation 0,58–0,85) возрастали от 9,8–12,0 м/с/кГц при F0–1



до 16,7–18,6 м/с/кГц при F3–4 (по METAVIR). По нашим данным, медиана SWDS также достоверно ( $p < 0,01$ ) увеличивалась с 12,0 м/с/кГц при F0–1 до 16,5 м/с/кГц при F3–4 (по METAVIR) с корреляцией по Spearman's  $\rho = 0,62$ .

Вместе с тем нельзя пройти мимо некоторых публикаций [11, 15], в которых дисперсия скорости сдвиговых волн вообще не связывалась с выраженностью фиброза (Spearman's  $\rho = 0,08$ ) или воспалением (Pearson's correlation 0,27), а ее использование, по мнению авторов, в итоге никак не улучшало дифференциальную диагностику фиброза и воспаления печени.

Трудно согласиться с таким мнением, но и при анализе полученных нами показателей также напрашивается вывод о том, что сам по себе высокий уровень SWDS не является однозначным критерием ни для диагностики воспаления, ни для диагностики выраженного фиброза, поскольку встречается при обоих патологических процессах.

По нашему мнению, исходя из графика (см. рис. 7), указывающего на тесную корреляцию между SWS и SWDS (Spearman's  $\rho = 0,74$ ), совершенно очевиден и другой вывод – вывод о существовании тандема (хотя и непропорционального) этих двух величин. На наш взгляд, именно в этой непропорциональности и просматривается возможный ключ к решению проблемы.

Анализируя представленный график, мы дополнительно разделили основную группу еще на 2 части в зависимости от отношения к линии регрессии. Получилось, что под линией регрессии в подавляющем большинстве расположились наблюдения больных с отсутствием основных серологических признаков воспаления (АЛТ – 20,4 (17,1–26,6); АСТ – 22 (18,6–27,5); ГГТП – 32 (25–41,9)). В то же время над линией регрессии в значительном числе случаев биохимический анализ указывал на отчетливое ( $p < 0,05$ ) наличие воспалительных изменений (АЛТ – 59,6 (35,3–82,7); АСТ – 62,6 (37,4–98,6); ГГТП – 145,1 (60,3–220,1)).

На основании этих данных нами была предложена формула бинарной логистической регрессии:

$$\text{logit}(p) = 0,4152 \text{ SWDS (м/с/кГц)} - 0,1344 \text{ SWS (м/с)} - 6,5115,$$

которая дает возможность с определенной вероятностью (в %) сделать заключение о наличии и отсутствии воспалительных изменений.

## Заключение

Таким образом, использование абсолютных значений SWDS не способствовало достижению цели настоящего исследования – обнаружению отчетливых критериев дифференциальной диаг-

ности наличия и выраженности фиброза у больных с гепатитом.

Тем не менее результаты исследования дают основание сделать достаточно уверенное заключение о том, что оценка взаимоотношений SWDS и SWS с помощью формулы бинарной логистической регрессии может стать ценным дополнительным методом ультразвуковой диагностики воспалительных изменений в печени.

## Участие авторов

Зыкин Б.И. – концепция и дизайн исследования, обзор публикаций по теме статьи, статистическая обработка, анализ и интерпретация полученных данных, подготовка, создание опубликованной работы, утверждение окончательного варианта статьи.

Ионова Е.А. – проведение исследования, сбор, обработка, анализ и интерпретация полученных данных, подготовка и редактирование текста, участие в научном дизайне, утверждение окончательного варианта статьи.

Аносова Т.А. – проведение исследования, обзор публикаций по теме статьи, сбор, обработка, анализ и интерпретация полученных данных, написание текста, участие в научном дизайне, ответственность за целостность всех частей статьи.

## Authors' participation

Zykin B.I. – concept and design of the study, review of publications, statistical analysis, analysis and interpretation of the obtained data, writing text, text preparation and editing, participation in scientific design, approval of the final version of the article.

Ionova E.A. – conducting research, collection, analysis and interpretation of the obtained data, text preparation and editing, participation in scientific design.

Anosova T.A. – conducting research, collection and analysis of data, review of publications, analysis and interpretation of the obtained data, participation in scientific design, 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. Зубарев А.В., Гажонова В.Е., Гусакова Е.В., Чуркина С.О., Миронова Е.В. Новые ультразвуковые технологии: дисперсия и эластография сдвиговой волны в диагностике постковидных повреждений печени. *Кремлевская медицина. Клинический вестник*. 2022; 1: 16–20. <http://doi.org/10.26269/4qvs-nz51>  
Zubarev A.V., Gazhonova V.E., Gusakova E.V., Churkina S.O., Mironova E.V. New ultrasound technologies: shear wave dispersion and shear wave elastography in the diagnosis of post-Covid-19 liver injury. *Kremlin Medicine Journal*. 2022; 1: 16–20. <http://doi.org/10.26269/4qvs-nz51> (In Russian)
2. Sugimoto K., Moriyasu F., Oshiro H. et al. Clinical utilization of shear wave dispersion imaging in diffuse liver disease. *Ultrasonography*. 2020; 39 (1): 3–10. <http://doi.org/10.14366/usg.19031>



3. Ferraioli G., Maiocchi L., Dellafiore C. et al. Performance and cutoffs for liver fibrosis staging of a two-dimensional shear wave elastography technique. *Eur. J. Gastroenterol. Hepatol.* 2021; 33 (1): 89–95. <http://doi.org/10.1097/MEG.0000000000001702>.
4. Ferraioli G., Barr R.G., Berzigotti A. et al. WFUMB Guideline/Guidance on Liver Multiparametric Ultrasound: Pt 1. Update to 2018 Guidelines on Liver Ultrasound Elastography. *Ultrasound Med. Biol.* 2024; 50 (8): 1071–1087. <http://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2024.03.013>
5. Zheng Y., Chen X., Yao A. et al. Shear Wave Propagation in Soft Tissue and Ultrasound Vibrometry. In: *Wave Propagation Theories and Applications* / Ed. Zheng Y. InTechOpen, 2013. Ch. 1: 1–23. <http://doi.org/10.5772/3393>
6. Кристенсен Р. Введение в теорию вязкоупругости. М.: Мир, 1974. 338 с.  
Christensen R.M. Theory of Viscoelasticity. NY: Academic Press, 1974. 338 p.
7. Sandrin L., Jennifer O., Cécile B. et al. Non-Invasive Assessment of Liver Fibrosis by Vibration-Controlled Transient Elastography (Fibroscan). In: *Liver Biopsy* / Ed. Takahashi H. IntechOpen. 2011; Ch. 19: 293–314. <http://doi.org/10.5772/811>
8. Mueller S., Millionig G., Sarovska L. et al. Increased liver stiffness in alcoholic liver disease: Differentiating fibrosis from steatohepatitis. *Wld J. Gastroenterol.* 2010; 16 (8): 966–972.
9. Deffieux T., Montaldo G., Tanter M., Fink M. Shear wave spectroscopy for in vivo quantification of human soft tissues visco-elasticity. *IEEE Trans. Med. Imaging.* 2009; 28 (3): 313–322. <http://doi.org/10.1109/TMI.2008.925077>
10. Garcovich M., Paratore M., Ainora M.E. et al. Shear Wave Dispersion in Chronic Liver Disease: From Physical Principles to Clinical Usefulness. *J. Pers. Med.* 2023; 13 (6): 945. <http://doi.org/10.3390/jpm13060945>
11. Wang K., Yu D., Li G. et al. Comparison of the diagnostic performance of shear wave elastography with shear wave dispersion for pre-operative staging of hepatic fibrosis in patients with hepatocellular carcinoma. *Eur. J. Radiol.* 2022; 154: 110459. <http://doi.org/10.1016/j.ejrad.2022.110459>
12. Zhang X., Zheng R., Jin J. et al. US Shear-Wave Elastography Dispersion for Characterization of Chronic Liver Disease. *Radiology.* 2022; 305 (3): 597–605. <http://doi.org/10.1148/radiol.212609>
13. Lee D.H., Cho E.J., Bae J.S. et al. Accuracy of Two-Dimensional Shear Wave Elastography and Attenuation Imaging for Evaluation of Patients With Nonalcoholic Steatohepatitis. *Clin. Gastroenterol. Hepatol.* 2021; 19 (4): 797–805.e7. <http://doi.org/10.1016/j.cgh.2020.05.034>
14. Ormachea J., Parker K.J. Comprehensive Viscoelastic Characterization of Tissues and the Inter-relationship of Shear Wave (Group and Phase) Velocity, Attenuation and Dispersion. *Ultrasound Med. Biol.* 2020; 46 (12): 3448–3459. <http://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2020.08.023>
15. Ferraioli G., Barr R.G., Farrokh A. et al. How to perform shear wave elastography. Pt I. *Med. Ultrason.* 2022; 24 (1): 95–106. <http://doi.org/10.11152/mu-3217>
16. Jang J.K., Lee E.S., Seo J.W. et al. Two-dimensional Shear-Wave Elastography and US Attenuation Imaging for Nonalcoholic Steatohepatitis Diagnosis: A Cross-sectional, Multicenter Study. *Radiology.* 2022; 305 (1): 118–126. <http://doi.org/10.1148/radiol.220220>
17. Gao J., Lee R., Trujillo M. Reliability of Performing Multiparametric Ultrasound in Adult Livers. *J. Ultrasound Med.* 2022; 41 (3): 699–711. <http://doi.org/10.1002/jum.15751>
18. Trout A., Xanthakos S., Bennett P., Dillman J. Liver Shear Wave Speed and Other Quantitative Ultrasound Measures of Liver Parenchyma: Prospective Evaluation in Healthy Children and Adults. *Am. J. Roentgenol.* 2020; 214 (3): 557–565. <http://doi.org/10.2214/AJR.19.21796>
19. Seyrek S., Ayyildiz H., Bulakci M. et al. Comparison of Fibroscan, Shear Wave Elastography, and Shear Wave Dispersion Measurements in Evaluating Fibrosis and Necroinflammation in Patients Who Underwent Liver Biopsy. *Ultrasound Q.* 2024; 40 (1): 74–81. <http://doi.org/10.1097/RUQ.0000000000000677>

**Для корреспонденции\*:** Аносова Татьяна Александровна – e-mail: doc.anosovaTA@yandex.ru

**Зыкин Борис Иванович** – доктор мед. наук, профессор кафедры лучевой диагностики с курсом радиологии Медико-биологического университета инноваций и непрерывного образования ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва. <https://orcid.org/0000-0002-8871-1434>

**Ионова Елена Александровна** – доктор мед. наук, и.о. заведующей лучевой диагностики с курсом радиологии Медико-биологического университета инноваций и непрерывного образования ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России; заведующая отделением ультразвуковой диагностики ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва. <https://orcid.org/0000-0002-6084-2061>

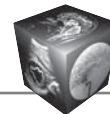
**Аносова Татьяна Александровна** – канд. мед. наук, доцент кафедры лучевой диагностики с курсом радиологии Медико-биологического университета инноваций и непрерывного образования ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва. <https://orcid.org/0009-0000-9014-2165>

**Contact\*:** Tatyana A. Anosova – e-mail: doc.anosovaTA@yandex.ru

**Boris I. Zykin** – Doct. of Sci. (Med.), Professor, Department of radiology, Medical and Biological University of innovation and continuing education of Federal Medical Biophysical Center named after A.I. Burnazyan Russia's Federal Medical-Biological Agency, Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-8871-1434>

**Elena A. Ionova** – Doct. of Sci. (Med.), Head of Department of radiology, Medical and Biological University of innovation and continuing education of Federal Medical Biophysical Center named after A.I. Burnazyan Russia's Federal Medical-Biological Agency, Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-6084-2061>

**Tatyana A. Anosova** – Cand. of Sci. (Med.), Assistant professor, Department of radiology, Medical and Biological University of innovation and continuing education of Federal Medical Biophysical Center named after A.I. Burnazyan Russia's Federal Medical-Biological Agency, Moscow. <https://orcid.org/0009-0000-9014-2165>



ISSN 1607-0763 (Print); ISSN 2408-9516 (Online)

<https://doi.org/10.24835/1607-0763-1463>

## Объемная КТ-перфузия печени при портальной гипертензии: диагностический потенциал и клиническое значение

© Джураева Н.М., Вахидова Н.Т.\* , Амирхамзаев А.Т., Абдухалимова Х.В., Султанов А.Т., Хурсанова Д.Х., Миртаджиева З.Д., Магзумова С.Х.

ГУ “Республиканский специализированный научно-практический медицинский центр хирургии имени академика В. Вахидова”; 100115 Ташкент, ул. Кичикхалкайули, д. 10, Республика Узбекистан

**Актуальность.** В современных исследованиях акцент делается на анализ гемодинамических изменений в печени при диффузных заболеваниях, а также на роль механизмов, повышающих артериальную перфузию при снижении портального кровотока. Диффузные заболевания печени со временем приводят к фиброзу и риску развития цирроза, инвазивная биопсия остается единственным точным методом для стадирования у пациентов данной группы. Неинвазивные диагностические подходы, включая эластографию и шкалу оценки Child–Pugh, обеспечивают эффективную оценку степени тяжести цирроза печени. Перфузионная КТ (ПКТ) позволяет определить функциональное состояние гепатоцитов и определить их микроциркуляцию. Метод безопасен, обладает высокой разрешающей способностью и предоставляет комплексные параметры перфузии печени. Широкодетекторные компьютерные томографы позволяют нивелировать различные артефакты, получить перфузионные изображения печени за один оборот рентгеновской трубки и расширяют диагностические возможности данной методики.

**Цель исследования:** оценка диагностической эффективности объемной ПКТ в определении степени выраженности гемодинамических нарушений у пациентов с портальной гипертензией (ПГ) с учетом уровня блока портального кровообращения.

**Материал и методы.** В проспективном исследовании приняло участие 110 пациентов, разделенных на 4 группы: 63 пациента с циррозом печени (ЦП) (блок на уровне внутривенного постсинусоидального кровообращения); 10 пациентов с фиброзом печени (ФП) (блок на уровне внутривенного пресинусоидального кровообращения); 13 пациентов с ПГ внепеченочной этиологии (блок на уровне подпеченочного кровообращения), 24 пациента контрольной группы – доноры фрагмента печени. В рамках исследования оценивались показатели перфузии печени, такие как артериальная перфузия (AP), портальная перфузия (PP) и печеночно-перфузионный индекс (HPI).

**Результаты.** Наиболее выраженные отклонения перфузии печени верифицированы при подпеченочном блоке (ВПП) с существенным ростом печеночного индекса ( $35,6 \pm 1,5\%$ ;  $p < 0,001$ ). При ЦП с постсинусоидальным блоком отмечено достоверное снижение портальной фракции (указать значения ПФ), компенсаторное увеличение артериального кровотока до  $41,4 \pm 0,7$  мл/100 мл/мин и соответственно более высокий рост печеночного индекса ( $23,8 \pm 0,4\%$ ;  $p < 0,001$ ). Парадоксальные изменения показателей перфузии с формированием гиперкинетического типа кровообращения и увеличением портального кровотока относительно нормативных значений до  $169,4 \pm 5,0$  мл/100 мл/мин ( $p < 0,01$ ) получены при ФП.

**Закключение.** Полученные результаты подтверждают диагностическую эффективность объемной КТ-перфузии и ее значимость в оценке, прогнозировании выраженности гемодинамических нарушений у пациентов с учетом уровня блока портального кровообращения.

**Ключевые слова:** перфузионная КТ; цирроз печени; фиброз печени; портальная гипертензия

**Авторы подтверждают отсутствие конфликтов интересов.**

**Для цитирования:** Джураева Н.М., Вахидова Н.Т., Амирхамзаев А.Т., Абдухалимова Х.В., Султанов А.Т., Хурсанова Д.Х., Миртаджиева З.Д., Магзумова С.Х. Объемная КТ-перфузия печени при портальной гипертензии: диагностический потенциал и клиническое значение. *Медицинская визуализация*. 2025; 29 (1): 51–61. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1463>

Поступила в редакцию: 16.03.2024.

Принята к печати: 22.01.2025.

Опубликована online: 14.02.2025.



# Role of volumetric CT perfusion of the liver in portal hypertension considering the level of portal circulation blocking: a prospective study

© Nigora M. Djuraeva, Nargiza T. Vakhidova\*, Aibek T. Amirkhamzaev, Khanum V. Abdukhalimova, Alisher T. Sultanov, Dilnura Kh. Khursanova, Zilola D. Mirtadzhieva, Saodat Kh. Magzumova

State Institution "Republican Specialized Scientific and Practical Medical Center for Surgery named after academician V. Vakhidov"; 10, Kichikkhalkayuli str., Tashkent 100115, Uzbekistan

**Relevance.** Modern studies focus on the analysis of hemodynamic changes in the liver in diffuse pathologies, as well as the role of mechanisms that increase arterial perfusion with a decrease in portal blood flow. Diffuse liver diseases eventually lead to fibrosis and the risk of cirrhosis, but invasive biopsy remains the only accurate method for staging. Non-invasive methods such as elastography and the Child–Pugh scale help assess the severity of liver cirrhosis. Perfusion CT (PCT) allows you to determine the functional state of hepatocytes and determine their microcirculation. The method is safe, has a high resolution and provides complex parameters of liver perfusion. Wide-detector CT allows you to level out various artifacts, obtain perfusion images of the liver in a single scan and expand the diagnostic capabilities of this technique.

**The aim:** to evaluate the diagnostic effectiveness of volumetric perfusion CT in determining the severity of hemodynamic disorders in patients with portal hypertension (PH), taking into account the level of blockage of the portal circulation.

**Materials and methods.** The prospective study involved 110 patients divided into four groups: 63 patients with liver cirrhosis (LC) (block at the level of the intrahepatic postsinusoidal circulation); 10 patients with liver fibrosis (LF) (block at the level of intrahepatic presinusoidal circulation); 13 patients with PH of extrahepatic etiology (block at the level of the subhepatic circulation), 24 patients in the control group, donors of the liver fragment. The study assessed liver perfusion parameters such as arterial perfusion (AP), portal perfusion (PP) and hepatic perfusion index (HPI).

**Results.** The most pronounced deviations in liver perfusion were verified in subhepatic block (SHB), with a significant increase in the liver index ( $35.6 \pm 1.5\%$ ;  $p < 0.001$ ). In cirrhosis with postsinusoidal block, there was a significant decrease in the portal fraction, a compensatory increase in arterial blood flow to  $41.4 \pm 0.7$  ml/100 ml/min and, accordingly, a higher increase in the liver index ( $23.8 \pm 0.4\%$ ;  $p < 0.001$ ). Paradoxical changes in perfusion parameters with the formation of a hyperkinetic type of blood circulation and an increase in portal blood flow relative to normative values up to  $169.4 \pm 5.0$  ml/100 ml/min ( $p < 0.01$ ) were obtained in AF.

**Conclusion.** The results confirm the diagnostic effectiveness of volumetric CT perfusion and its significance in assessing and predicting the severity of hemodynamic disorders in patients, taking into account the level of blockage of the portal circulation.

**Keywords:** perfusion CT; liver cirrhosis; liver fibrosis; portal hypertension

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

**For citation:** Djuraeva N.M., Vakhidova N.T., Amirkhamzaev A.T., Abdukhalimova Kh.V., Sultanov A.T., Khursanova D.Kh., Mirtadzhieva Z.D., Magzumova S.Kh. Role of volumetric CT perfusion of the liver in portal hypertension considering the level of portal circulation blocking: a prospective study. *Medical Visualization*. 2025; 29 (1): 51–61. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1463>

**Received:** 16.03.2024.

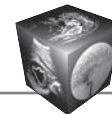
**Accepted for publication:** 22.01.2025.

**Published online:** 14.02.2025.

## Введение

В настоящее время наиболее актуальными исследованиями остаются изучение гемодинамических изменений в паренхиме печени на фоне диффузного патологического процесса и роль физиологических механизмов, повышающих артериальную перфузию органа, на фоне значительного снижения портального кровотока. Большинство диффузных заболеваний печени со временем при-

водят к формированию фиброза с риском развития цирроза. Единственный достоверный метод определения стадии заболевания – пункционная биопсия и последующее гистологическое исследование, но данный метод является инвазивным и сопряжен с осложнениями. В настоящее время определение степени тяжести цирроза печени основывается на клинических данных – шкале Child–Pugh, а основным неинвазив-



ным инструментальным методом считается эластография [1].

На сегодняшний день перфузионная компьютерная томография (ПКТ) предоставляет возможность оценки функционального состояния печени, а также количественного анализа параметров кровотока в тканях на определенном уровне сканирования. Этот метод основан на изучении накопления и динамики распределения контрастного вещества (КВ) в зоне интереса, что позволяет определить тип перфузии – ключевой показатель для выбора оптимальной тактики лечения и оценки его эффективности [2, 3]. Кроме того, в ряде исследований акцентируется внимание на высокой безопасности метода, его превосходном временном и пространственном разрешении, а также способности обеспечивать получение комплексных параметров перфузии печени [4].

ПКТ позволяет выявлять заболевания печени до появления морфологических изменений, дифференцировать доброкачественные и злокачественные новообразования. Многочисленные исследования подтверждают диагностическую ценность данного метода в оценке изменений в печеночной архитектонике и функции при хронических диффузных заболеваниях печени, а также адаптивных механизмах физиологии сосудов печени [5, 6].

Исследования параметров перфузии печени при хронических диффузных заболеваниях проводились в различных направлениях, включая анализ и сопоставление КТ- и МРТ-показателей, а также их корреляцию с клиническими данными [6].

В ряде работ оценивали разницу показателей ПКТ при циррозе печени (ЦП) и у здоровых лиц с такими органами, как селезенка и поджелудочная железа. С целью нивелирования артефактов и получения полной информации о перфузионных данных печени ряд работ были выполнены на широкодетекторных компьютерных томографах [7, 8].

В исследованиях D. Vonekamp (2012) и N. Wang (2022) была проведена оценка взаимосвязи тяжести фиброза, ЦП и гемодинамических нарушений при помощи определения фракции артериального усиления, а также изменения гемодинамики печени у пациентов с ЦП на фоне гепатита В [9–11].

В работах J. Dong и соавт. (2023) были изучены перфузионные показатели печени и селезенки при портальной гипертензии (ПГ) до и после операции TIPS. В послеоперационном периоде наблюдалось значительное увеличение печеночного артериального кровотока и значительное снижение селезеночного объема кровотока [12].

Несмотря на значительное количество исследований в данной области, анализ литературы

указывает на наличие недостаточно изученных аспектов применения ПКТ. В частности, большинство существующих исследований проводилось с использованием мультиспиральных компьютерных томографов предыдущих поколений, что подчеркивает актуальность изучения ПКТ, выполненной на современных широкодетекторных КТ-системах.

В исследованиях E. Talakić и соавт. (2017), как и в наших исследованиях, были получены перфузионные показатели AF, PF и HPI с использованием объемной КТ, где была определена высокая корреляционная связь между клиренсом селезенки (SCL) и ПГ у пациентов с ЦП при КТ-перфузии с чувствительностью 94% и специфичностью 100% в выявлении тяжелой степени ПГ [13]. Также в исследованиях H. Preibsch и соавт. (2017) было исследовано влияние портосистемных шунтов (ПСШ) на перфузию печени с использованием объемной ПКТ [14]. Хотя использование широкодетекторных компьютерных томографов позволяет получать достоверные перфузионные параметры, одним из ограничений данного метода по сравнению с другими типами КТ является невозможность оценки среднего времени транзита кровотока (МТТ).

## Материал и методы

Данное исследование одобрено локальным этическим комитетом ГУ “Республиканский специализированный научно-практический медицинский центр хирургии имени академика В. Вахидова”, протокол №7 от 15 октября 2024 г.

Исследования проводились на 320-рядном широкодетекторном компьютерном томографе Aquilion One версии Genesis (Canon Medical Systems, Япония) в ГУ “Республиканский специализированный научно-практический медицинский центр хирургии имени академика В. Вахидова” (Ташкент, Узбекистан). В исследовании приняло участие 110 пациентов в возрасте от 18 до 67 лет с диффузными заболеваниями печени, осложненными ПГ. Параметры сканирования были установлены следующим образом: напряжение рентгеновской трубки 100 кВ, ток 120 мА, время вращения гентри 0,5 с, толщина среза 320 x 0,5 мм, ширина детектора 16 см. Первоначально выполнялось нативное исследование для визуализации органов брюшной полости. Введение КВ осуществлялось с использованием бесколбового автоматического инжектора компании Ulrich (Германия) через кубитальный катетер диаметром 20 G. В качестве КВ применяли йодсодержащий препарат Biemexol (Iohexol®, Ankara, Турция) с концентрацией йода 350 мг/мл. Расчет разового объема



введения КВ и изотонического раствора натрия хлорида рассчитывался индивидуально: для массы тела 50–69 кг – 40 мл, 70–89 кг – 50 мл, >90 кг – 60 мл. Скорость введения составляла 6–8 мл/с в зависимости от массы тела (50–69 кг – 6 мл/с, 70–89 кг – 7 мл/с, >90 кг – 8 мл/с) [15, 16].

Общая продолжительность сканирования составляла 75 с (одно нативное сканирование с последующим 16-кратным сканированием каждые 2,5 с (от 12 до 50 с), затем 5 сканирований каждые 5 с).

Лучевая нагрузка, измеренная как продукт доза–длина (DLP), составила 1031,1 МГр·см для 21 объема сканирования, что эквивалентно эффективной дозе 15,4 мЗв (коэффициент преобразования  $k = 0,015$ ).

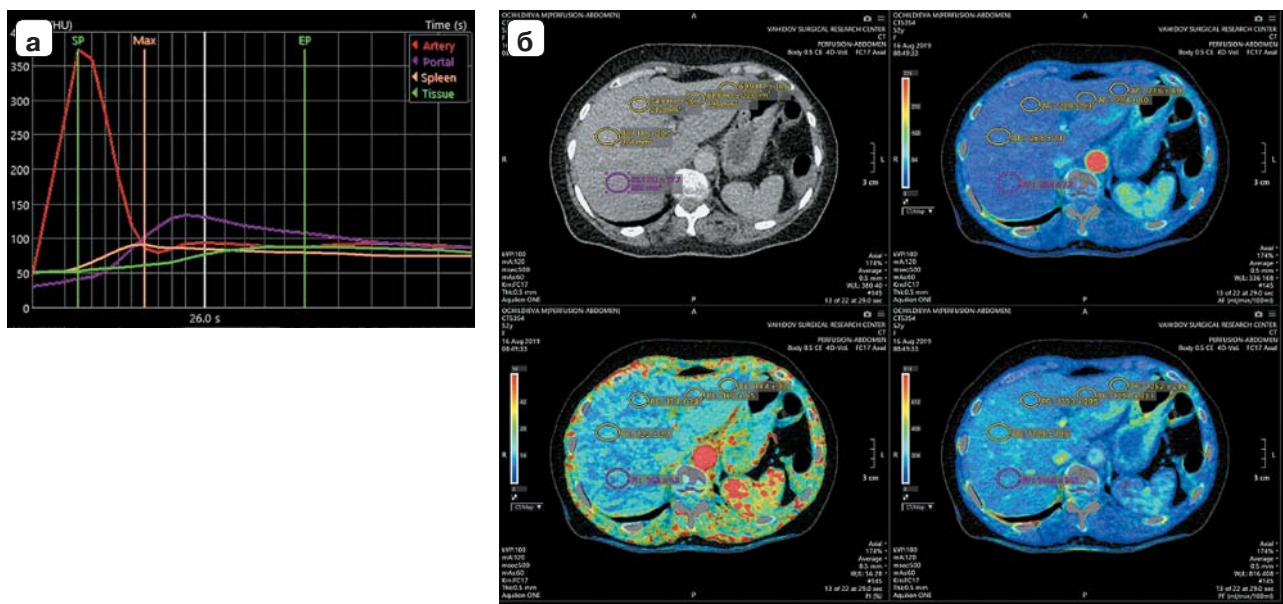
Постпроцессинг проводился на полуавтоматической станции Vitrea 7.4.0.462 (Canon Medical Systems) с использованием специальной программы “liver perfusion”. Для расчета перфузионных показателей применялась модель с двойным входом и максимальным наклоном. Область интереса в ручном режиме устанавливалась на брюшную аорту, воротную вену, паренхиму печени и селезенки. На основе полученных данных были построены перфузионные карты и временные кривые плотности (TDC). Сгенерированные

TDC позволили определить входную функцию печеночной артерии и портальной вены соответственно (рис. 1). Пиковая точка сформированных TDC селезенки использовалась для дифференциации циркуляции в печеночной артерии (до пика) и циркуляции в воротной вене (после пика).

С учетом уровня блока портального кровообращения пациенты были разделены на 4 группы: 63 пациента с ЦП (блок на уровне внутрипеченочного постсинусоидального кровообращения), 10 пациентов с фиброзом печени (ФП) (блок на уровне внутрипеченочного пресинусоидального кровообращения), 13 пациентов с внепеченочной ПГ (ВППГ), 24 пациента контрольной группы (доноры фрагмента печени) для определения нормальных значений перфузионных показателей печени (AF, PF, HPI) в сравнении с патологическими изменениями.

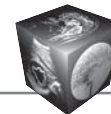
Перфузионные показатели изучались во всех сегментах печени – в общей сложности в 8 точках, то есть для 110 обследованных было получено 880 показателей AF (мл/100 мл/мин), PF (мл/100 мл/мин) и HPI (%).

Для каждого показателя были вычислены: среднее значение ( $M$ ), стандартное отклонение ( $\sigma$ ). Оценка статистической достоверности проводилась с использованием  $t$ -критерия Стьюдента.



**Рис. 1.** Модель перфузии печени с двойным входом и максимальным наклоном, с временной кривой плотности (TDC) для аорты, воротной вены, селезенки и печени (а) и параметрические изображения (б) артериального кровотока в печени (HAF; слева сверху), портального кровотока (PVF; слева снизу) и печеночного перфузионного индекса (HPI; справа снизу). Начальная точка – SP, конечная точка – EP, селезеночный максимум – Max.

**Fig. 1.** Dual-input, maximum-slope liver perfusion model with time density curve (TDC) for aorta, portal vein, spleen, and liver (а) and parametric images (б) of hepatic arterial flow (HAF; top left), portal blood flow (PVF; bottom left) and hepatic perfusion index (HPI; bottom right). Starting point – SP, ending point – EP, splenic maximum – Max.



## Результаты исследования

Анализ полученных данных при ПКТ печени показал статистически достоверные различия показателей при любом варианте блока портального кровотока и здоровыми субъектами, за исключением артериальной фракции при ФП (см. таблицу). Полученные значения (рис. 2) фракций перфузии печени показали высокую степень линейной зависимости изменений внутрипеченочного кровотока от этиологии ПГ по сравнению с нормативными параметрами.

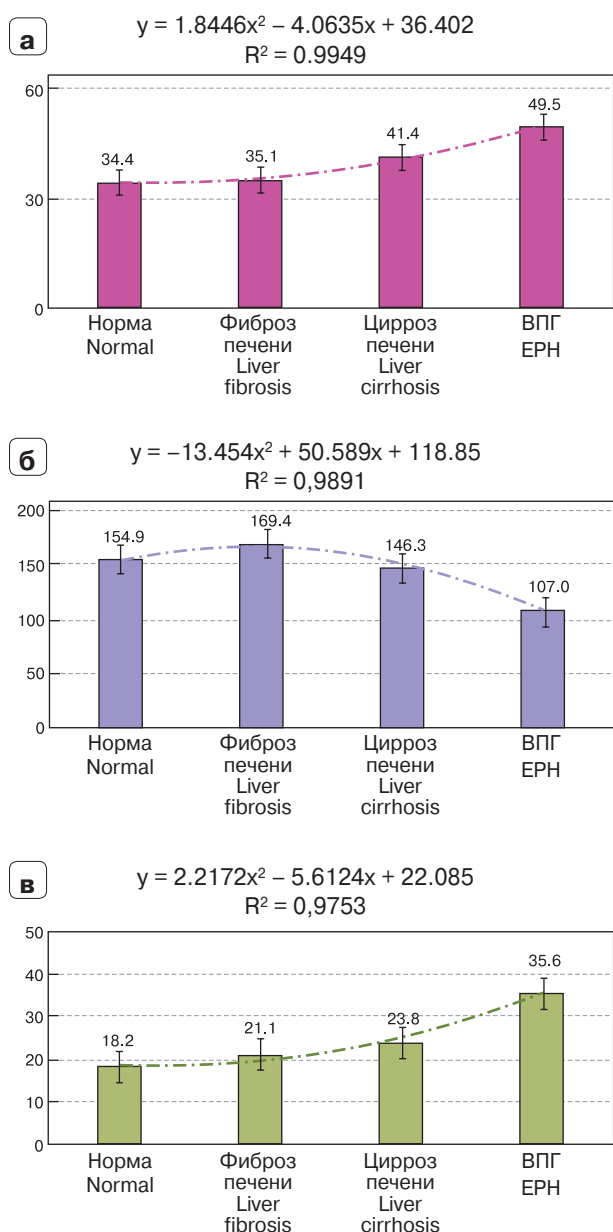
При ЦП определено снижение портального кровотока (PF) до  $146,3 \pm 3,1$  мл/100 мл/мин, в то время как нормальные показатели составляют –  $154,9 \pm 1,9$  мл/100 мл/мин ( $p < 0,05$ ). Соответственно снижению портальной фракции отмечено компенсаторное увеличение артериального кровотока (AF) до  $41,4 \pm 0,7$  мл/100 мл/мин при норме  $34,4 \pm 0,9$  мл/100 мл/мин ( $p < 0,001$ ). Указанные изменения обусловили повышение перфузионного индекса (PI) с его ростом по отношению к нормальным показателям ( $18,2 \pm 0,3$ ;  $p < 0,001$ ) за счет увеличения артериальной и уменьшения портальной фракции до  $23,8 \pm 0,4\%$ .

В отличие от нормальных показателей, при циррозе или фиброзе печени особенностью перфузионных показателей печени при ВПГ явилось максимальное отклонение фракций с самым низким показателем портального кровотока ( $107,0 \pm 5,5$  мл/100 мл/мин;  $p < 0,001$ ) и наиболее высоким компенсаторным увеличением артериальной фракции (до  $49,5 \pm 1,7$  мл/100 мл/мин;  $p < 0,001$ ). Это свидетельствует о том, что при формировании подпеченочного блока с частичным сохранением или полным отсутствием воротного кровотока значительная артериализация печени является результатом развития и прогрессирования ПГ в перинатальный период. Так, в 8 из 13 случаев ВПГ явилась результатом внутриутробного порока развития портальной системы – кавернозной трансформации воротной вены, в других 5 случаях тромбоз воротной вены или всего спленопортального русла был результатом ранней патологии новорожденных – пупочного сепсиса. Таким образом, особенностью формирования ПГ в перинатальный период является значительное снижение фракции портальной перфузии за счет частичного или полного блока воротного

**Таблица.** Показатели ПКТ печени при ПГ различного генеза

**Table.** Liver PCT parameters in PH of various origins

| Патология<br>Pathology                    | AF                   |          |     | PF                   |          |     | PI                    |          |     |
|-------------------------------------------|----------------------|----------|-----|----------------------|----------|-----|-----------------------|----------|-----|
|                                           | значение<br>value    | $\sigma$ | m   | значение<br>value    | $\sigma$ | m   | значение<br>value     | $\sigma$ | m   |
| Норма<br>Normal                           | 34.4                 | 11.9     | 0.9 | 154.9                | 26.2     | 1.9 | 18.2                  | 4.2      | 0.3 |
| Цирроз печени<br>Liver cirrhosis          | 41.4                 | 15.7     | 0.7 | 146.3                | 68.4     | 3.1 | 23.8                  | 9.2      | 0.4 |
| t-Критерий к норме<br>t-Test to normality | 6.32 ( $p < 0.001$ ) |          |     | 2.40 ( $p < 0.05$ )  |          |     | 10.94 ( $p < 0.001$ ) |          |     |
| Фиброз печени<br>Liver fibrosis           | 35.1                 | 15.1     | 1.8 | 169.4                | 42.2     | 5.0 | 21.1                  | 6.1      | 0.7 |
| t-Критерий к норме<br>t-Test to normality | 0.35 ( $p > 0.05$ )  |          |     | 2.73 ( $p < 0.01$ )  |          |     | 3.72 ( $p < 0.001$ )  |          |     |
| t-Критерий к ЦП<br>t-Test to LC           | 3.29 ( $p < 0.01$ )  |          |     | 3.97 ( $p < 0.001$ ) |          |     | 3.25 ( $p < 0.01$ )   |          |     |
| ВПГ<br>EPH                                | 49.5                 | 17.0     | 1.7 | 107.0                | 56.3     | 5.5 | 35.6                  | 15.5     | 1.5 |
| t-Критерий к норме<br>t-Test to normality | 8.04 ( $p < 0.001$ ) |          |     | 8.20 ( $p < 0.001$ ) |          |     | 11.23 ( $p < 0.001$ ) |          |     |
| t-Критерий к ЦП<br>t-Test to LC           | 4.46 ( $p < 0.001$ ) |          |     | 6.22 ( $p < 0.001$ ) |          |     | 7.49 ( $p < 0.001$ )  |          |     |
| t-Критерий к ФП<br>t-Test to LF           | 5.89 ( $p < 0.001$ ) |          |     | 8.40 ( $p < 0.001$ ) |          |     | 8.62 ( $p < 0.001$ )  |          |     |



**Рис. 2.** Показатели КТ-перфузии печени. **а** – артериальная фракция; **б** – портальная фракция; **в** – печеночный индекс.

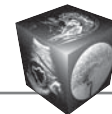
**Fig. 2.** CT liver perfusion parameters. **а** – AF; **б** – PF; **в** – PI.

кровотока (показатели которой в нашем исследовании были максимально низкими). При этом формирование компенсаторного венозного притока к печени за счет развития неопортальных сосудов происходит в течение нескольких лет. Следовательно, в условиях выраженного снижения портальной перфузии параллельно с прогрессированием ПГ и компенсаторным развитием неопортальных венозных коллатералей происхо-

дит существенное перераспределение артериального кровоснабжения печени. Резервные возможности этой фракции печеночного кровотока с учетом перинатального периода характеризуются максимальной возможностью трансформации артериального русла. Именно поэтому в нашем исследовании уровень артериальной перфузии при ВПГ достигал максимальных значений –  $49,5 \pm 1,7$  мл/100 мл/мин, тогда как при ЦП артериальная фракция компенсаторно увеличилась в среднем только до  $41,4 \pm 0,7$  мл/100 мл/мин ( $p < 0,001$ ). Соответственно максимальному перераспределению фракций внутрипеченочного кровотока в этой же группе был получен наиболее высокий перфузионный индекс –  $35,6 \pm 1,5\%$  ( $p < 0,001$ ).

Следует выделить парадоксальные изменения портальной фракции перфузии печени при ФП. В отличие от ЦП и ВПГ, характерной особенностью пресинуоидального блока явилось не снижение, а увеличение портального кровотока относительно нормальных значений до  $169,4 \pm 5,0$  мл/100 мл/мин ( $p < 0,01$ ). То есть в этих случаях определен гиперкинетический тип портального кровообращения. В формировании гиперкинетической ПГ, помимо артериовенозных фистул, имеет значение развитие портопеченочных венозных коллатералей. Это позволяет предположить, что на фоне ФП с пресинуоидальным блоком полученные высокие показатели портальной перфузии являются следствием функциональной активности портопеченочных венозных коллатералей. Выраженный склеротический процесс с узловой трансформацией при ЦП за счет некроза гепатоцитов приводит к снижению портальной перфузии печени, что усугубляет течение патологического процесса, формируя порочный круг. В этой ситуации функциональный статус гепатоцитов имеет решающее значение в плане прогноза заболевания. В свою очередь, при ФП функция гепатоцитов не нарушена, а фактором агрессии служат именно прогрессирующая ПГ и ее осложнения (пищеводно-желудочные кровотечения). Это доказывает тот факт, что выполнение шунтирующих операций при ФП не приводит к ухудшению функции гепатоцитов, но позволяет радикально решить проблему ПГ. Это связано с тем, что исходный гиперкинетический тип портального кровотока на фоне декомпрессии портальной системы при портосистемном шунтировании обеспечивает сохранение гепатопетального кровотока.

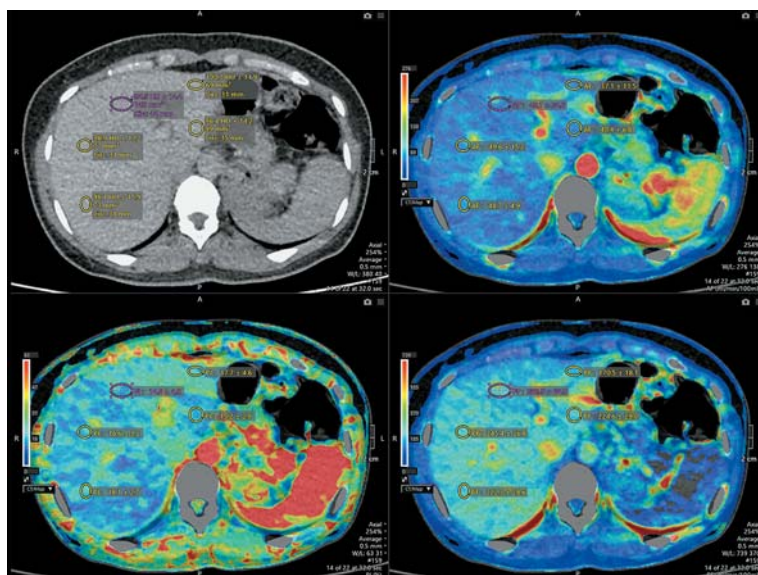
Другой особенностью перфузии печени при ФП является то, что на фоне повышенных значений портальной фракции не отмечено достоверного увеличения артериального кровотока



( $35,1 \pm 1,8$  мл/100 мл/мин;  $p > 0,05$ ). В свою очередь, среднее значение перфузионного индекса (PI), несмотря на повышение портальной фракции, оказалось достоверно выше по отношению к нормальным показателям ( $21,1 \pm 0,7\%$ ;  $p < 0,001$ ). Это свидетельствует о том, что, несмотря на отсутствие разницы по объему артериального притока при ФП и в норме, все же при пресинуoidalном блоке происходит изменение соотношения перфузионных фракций печеночного кровотока в сторону увеличения артериальной фракции. Это также доказывает, что гиперкинетический тип портального кровотока при ФП обусловлен разви-

тием портопеченочных коллатералей и, несмотря на усиление притока, этот эффект в качественном значении не позволяет поддерживать адекватное кровоснабжение печени, вследствие чего и изменяется PI с увеличением портальной фракции.

В качестве иллюстративных примеров на рис. 3–6 приведены показатели перфузии печени в норме, при ЦП, ФП и ВПГ. Также следует отметить, что КТ-ангиография позволяет определить особенности ангиоархитектоники воротной системы, что имеет значение при планировании различных вариантов хирургического лечения, включая портосистемное шунтирование, разобщающие



**Рис. 3.** Показатели КТ-перфузии печени донора.

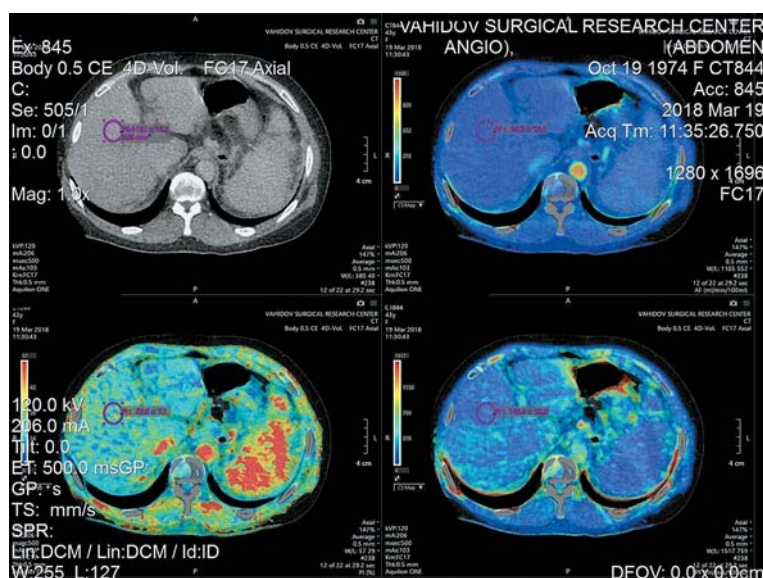
Показатели ПКТ:

|                   |                  |
|-------------------|------------------|
| AF, мл/100 мл/мин | $33,5 \pm 13,0$  |
| PF, мл/100 мл/мин | $155,8 \pm 33,0$ |
| PI, %             | $17,0 \pm 4,0$   |

**Fig. 3.** Liver CT-perfusion parameters of the donor.

PCT indicators:

|                   |                  |
|-------------------|------------------|
| AF, ml/100 ml/min | $33.5 \pm 13.0$  |
| PF, ml/100 ml/min | $155.8 \pm 33.0$ |
| PI, %             | $17.0 \pm 4.0$   |



**Рис. 4.** Показатели КТ-перфузии печени у пациента с циррозом печени.

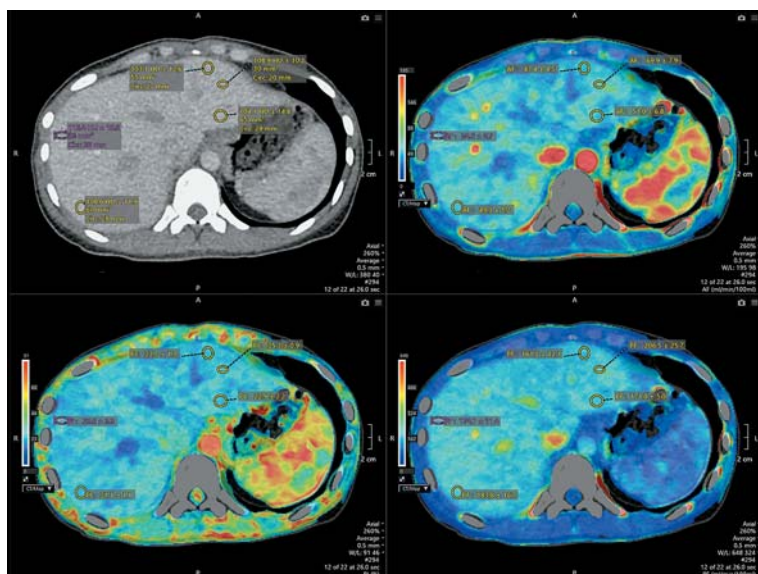
Показатели ПКТ:

|                   |                |
|-------------------|----------------|
| AF, мл/100 мл/мин | $40,5 \pm 7,8$ |
| PF, мл/100 мл/мин | $136 \pm 14,6$ |
| PI, %             | $24,0 \pm 5,5$ |

**Fig. 4.** CT perfusion parameters in-patient with liver cirrhosis.

PCT indicators:

|                   |                |
|-------------------|----------------|
| AF, ml/100 ml/min | $40.5 \pm 7.8$ |
| PF, ml/100 ml/min | $136 \pm 14.6$ |
| PI, %             | $24.0 \pm 5.5$ |



**Рис. 5.** Показатели КТ-перфузии у пациента с фиброзом печени.

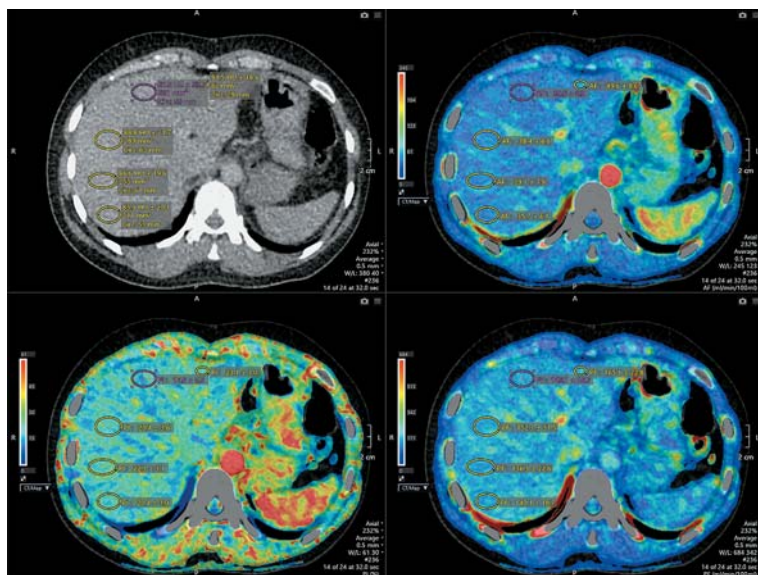
Показатели ПКТ:

|                   |                |
|-------------------|----------------|
| AF, мл/100 мл/мин | $36 \pm 7,0$   |
| PF, мл/100 мл/мин | $166 \pm 20,0$ |
| PI, %             | $19,2 \pm 1,8$ |

**Fig. 5.** CT perfusion parameters in-patient with liver fibrosis.

PCT indicators:

|                   |                |
|-------------------|----------------|
| AF, ml/100 ml/min | $36 \pm 7.0$   |
| PF, ml/100 ml/min | $166 \pm 20.0$ |
| PI, %             | $19.2 \pm 1.8$ |



**Рис. 6.** Показатели КТ-перфузии печени при у пациента с ВПГ.

Показатели ПКТ:

|                   |                  |
|-------------------|------------------|
| AF, мл/100 мл/мин | $47,5 \pm 7,8$   |
| PF, мл/100 мл/мин | $105,3 \pm 22,0$ |
| PI, %             | $31,5 \pm 6,0$   |

**Fig. 6.** CT perfusion parameters of the liver in-patient with extrahepatic PH.

PCT indicators:

|                   |                  |
|-------------------|------------------|
| AF, ml/100 ml/min | $47.5 \pm 7.8$   |
| PF, ml/100 ml/min | $105.3 \pm 22.0$ |
| PI, %             | $31.5 \pm 6.0$   |

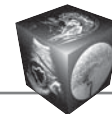
вмешательства, а также трансплантацию печени. Такая визуализация сосудистого русла позволяет четко определить особенности портальной и артериальной архитектуры.

## Обсуждение

Данные нашего исследования подтверждают значительные изменения гемодинамики печени при различных уровнях блокировки портального кровообращения. Наблюдается компенсаторное увеличение артериального кровотока при снижении портального, что выражается в повышении PI и AF. Эти показатели могут служить маркерами степени нарушения портального кровообращения и уровня адаптации сосудистой системы печени.

Полученные результаты согласуются с выводами исследований D. Vonekamp и соавт. (2012), где установлено, что AF увеличивается пропорционально прогрессированию фиброза и цирроза печени [10]. Это подтверждает, что компенсаторное увеличение артериального кровоснабжения связано с капилляризацией синусоидов и отложением коллагена в пространстве Диссе. Так же, как и в нашем исследовании, они выявили, что AF может различать стадии заболевания с высокой чувствительностью и специфичностью.

Исследование S. Guan и соавт. (2005), проведенное на модели крыс, показало аналогичную динамику изменений параметров перфузии на разных стадиях: снижение кровотока и объема



крови при прогрессировании ЦП. Это указывает на универсальность наблюдаемых паттернов и подчеркивает клиническую значимость ранней диагностики, возможной благодаря ПКТ [17].

ПКТ печени демонстрирует высокую эффективность в клинической практике. К примеру: в оценке стадии заболевания, возможностью раннего выявления изменений кровообращения, характерных для фиброза и цирроза печени, что важно для своевременного начала терапии. В отношении мониторинга лечения как неинвазивный контроль динамики состояния печени, позволяющий проводить динамическое наблюдение за эффективностью терапии и корректировать тактику лечения при необходимости. Также ПКТ является информативным методом для планирования оптимальной тактики хирургического лечения, включая такие методы, как ПСШ или трансплантация печени.

Несмотря на высокую диагностическую ценность ПКТ, существуют определенные недостатки метода. Результаты могут зависеть от технических параметров оборудования и параметров сканирования. Как отмечено Е. Talakіć и соавт., ограничения используемой модели оборудования могут повлиять на точность определения времени среднего транзита и другие показатели ПКТ, что может сужать спектр клинического применения метода. Необходимо также стандартизировать протоколы проведения ПКТ, включая калибровку оборудования и унификацию параметров анализа. Интерпретация показателей ПКТ может затрудняться в условиях воспалительных процессов, что подтверждается данными исследований, где АФ отражала как фиброзные изменения в печени, так и острую воспалительную реакцию. Как отмечено в работе Е. Talakіć и соавт (2017), специфические параметры, такие как PI, могут быть менее информативны в отдельных случаях при значительных адаптационных изменениях кровотока [13].

Таким образом, данное исследование подтверждает, что использование объемной ПКТ позволяет эффективно выявлять компенсаторные механизмы и адаптационные изменения кровотока при различных формах ПГ, обеспечивая углубленное понимание изменений внутрипеченочной гемодинамики.

Применение объемной ПКТ открывает значительные перспективы для улучшения диагностики и терапии пациентов с ПГ и диффузными заболеваниями печени. Метод обладает высоким потенциалом для интеграции в клиническую практику, особенно в условиях ограниченной доступности инвазивных процедур. Тем не менее дальнейшие исследования должны быть направлены на стан-

дартизацию протоколов и устранение существующих технических ограничений.

## Заключение

Выявлена достоверная корреляция между этиологическим фактором развития ПГ и особенностями изменения печеночной перфузии относительно нормативных значений.

Наиболее выраженные отклонения перфузии печени верифицированы при подпеченочном блоке (ВПГ). Они характеризуются сохранением минимального уровня портальной фракции ( $107,0 \pm 5,5$  мл/100 мл/мин;  $p < 0,001$ ) при частичном или полном отсутствии воротного кровотока, что обуславливает максимальную компенсаторную стимуляцию резервных возможностей артериального обеспечения ( $49,5 \pm 1,7$  мл/100 мл/мин;  $p < 0,001$ ) с существенным ростом печеночного индекса ( $35,6 \pm 1,5\%$ ;  $p < 0,001$ ).

При ЦП с постсинусоидальным блоком отмечено достоверное снижение портальной фракции до  $146,3 \pm 3,1$  мл/100 мл/мин ( $p < 0,05$ ), что вызывает компенсаторное увеличение артериального кровотока до  $41,4 \pm 0,7$  мл/100 мл/мин и соответственно более высокий рост печеночного индекса ( $23,8 \pm 0,4\%$ ;  $p < 0,001$ ).

Парадоксальные изменения показателей перфузии с формированием гиперкинетического типа кровообращения и увеличением портального кровотока относительно нормативных значений до  $169,4 \pm 5,0$  мл/100 мл/мин ( $p < 0,01$ ) получены при ФП. Это обусловило незначительное изменение артериального кровотока ( $35,1 \pm 1,8$  мл/100 мл/мин против  $34,4 \pm 0,9$  мл/100 мл/мин;  $p > 0,05$ ) с минимально выраженным ростом печеночного индекса (с  $18,2 \pm 0,3\%$  до  $21,1 \pm 0,7\%$ ;  $p < 0,001$ ).

## Участие авторов

Джураева Н.М. – концепция и дизайн исследования, ответственность за целостность всех частей статьи, утверждение окончательного варианта статьи.

Вахидова Н.Т. – статистическая обработка данных, анализ и интерпретация полученных данных, написание текста, подготовка и редактирование текста.

Амирхамзаев А.Т. – проведение исследования, сбор и обработка данных.

Абдухалимова Х.В. – участие в научном дизайне, ответственность за целостность всех частей статьи.

Султанов А.Т. – проведение исследования, сбор и обработка данных.

Хурсанова Д.Х. – обзор публикаций по теме статьи, статистическая обработка данных.

Миртаджиева З.Д. – проведение исследования, сбор и обработка данных.

Магзумова С.Х. – анализ и интерпретация полученных данных, участие в научном дизайне.

**Authors' participation**

Djuraeva N.M. – concept and design of the study, responsibility for the integrity of all parts of the article, approval of the final version of the article.

Vakhidova N.T. – statistical analysis, analysis and interpretation of the obtained data, writing text, text preparation and editing.

Amirkhamzaev A.T. – conducting research, collection and analysis of data.

Abdukhalimova Kh.V. – participation in scientific design, responsibility for the integrity of all parts of the article.

Sultanov A.T. – conducting research, collection and analysis of data.

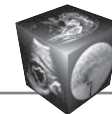
Khursanova D.Kh. – review of publications, statistical analysis.

Mirtadzhieva Z.D. – conducting research, collection and analysis of data.

Magzumova S.Kh. – analysis and interpretation of the obtained data, participation in scientific design.

**Список литературы [References]**

1. Li Y., Pan Q., Zhao H. Investigation of the values of CT perfusion imaging and ultrasound elastography in the diagnosis of liver fibrosis. *Exp. Ther. Med.* 2018; 16 (2): 896–900. <https://doi.org/10.3892/etm.2018.6269>
2. Сташук Г.А. Прогностическое значение перфузионной компьютерной томографии в диагностике фиброза и цирроза печени. Пилотное исследование. *Альманах клинической медицины.* 2020; 48 (6): 387–394. <http://doi.org/10.18786/2072-0505-2020-48-057>  
Stashuk G.A. Prognostic value of perfusion computed tomography in the diagnosis of liver fibrosis and cirrhosis. Pilot study. *Almanac of Clinical Medicine.* 2020; 48 (6): 387–394. <http://doi.org/10.18786/2072-0505-2020-48-057> (In Russian)
3. Spira D. Volume perfusion-CT of the liver: Insights and applications. *Eur. J. Radiol.* 2012; 81 (7): 1471–1478. <http://doi.org/10.1016/j.ejrad.2011.04.010>
4. Wang X., Xue H.D., Jin Z.Y. et al. Quantitative hepatic CT perfusion measurement: Comparison of Couinaud's hepatic segments with dual-source 128-slice CT. *Eur. J. Radiol.* 2013; 82 (2): 220–226. <http://doi.org/10.1016/j.ejrad.2012.09.015>
5. Van Beers B.E., Leconte I., Materne R. et al. Hepatic perfusion parameters in chronic liver disease: Dynamic CT measurements correlated with disease severity. *Am. J. Roentgenol.* 2001; 176 (3): 667–673. <http://doi.org/10.2214/ajr.176.3.1760667>
6. Ronot M., Laporq B., Van Beers B.E., Vilgrain V. CT and MR perfusion techniques to assess diffuse liver disease. *Abdominal. Radiol.* 2020; 45 (11): 3496–3506. <http://doi.org/10.1007/s00261-019-02338-z>
7. Motosugi U., Ichikawa T., Sou H. et al. Multi-organ perfusion CT in the abdomen using a 320-detector row CT scanner: Preliminary results of perfusion changes in the liver, spleen, and pancreas of cirrhotic patients. *Eur. J. Radiol.* 2012; 81 (10): 2533–2537. <http://doi.org/10.1016/j.ejrad.2011.11.054>
8. Kanda T., Yoshikawa T., Ohno Y. et al. Perfusion measurement of the whole upper abdomen of patients with and without liver diseases: Initial experience with 320-detector row CT. *Eur. J. Radiol.* 2012; 81 (10): 2470–2475. <http://doi.org/10.1016/j.ejrad.2011.10.009>
9. Wang N., Sun Z. Clinical value of AEF in the post-processing technique of liver perfusion-like phase III enhanced CT scan in evaluating the degree of liver function impairment in patients with Hepatitis-B cirrhosis. *Pakistan J. Med. Sci.* 2022; 38 (7): 1899–1904. <http://doi.org/10.12669/pjms.38.7.5362>
10. Bonekamp D., Bonekamp S., Geiger B., Kamel I. An elevated arterial enhancement fraction is associated with clinical and imaging indices of liver fibrosis and cirrhosis. *J. Comput. Assis. Tomogr.* 2012; 36 (6): 681–689. <http://doi.org/10.1097/RCT.0b013e3182702ee3>
11. Wang L., Zhang Y., Wu Y.F. et al. Computed tomography perfusion in liver and spleen for hepatitis B virus-related portal hypertension: A correlation study with hepatic venous pressure gradient. *Wld J. Gastroenterol.* 2022; 28 (42): 6068–6077. <http://doi.org/10.3748/wjg.v28.i42.6068>
12. Dong J., Zhang Y., Wu Y.F. et al. Computed tomography perfusion in differentiating portal hypertension: A correlation study with hepatic venous pressure gradient. *Wld J. Gastrointest. Surg.* 2023; 15 (4): 664–673. <http://doi.org/10.4240/wjgs.v15.i4.664>
13. Talakić E., Schaffellner S., Kniepeiss D. et al. CT perfusion imaging of the liver and the spleen in patients with cirrhosis: Is there a correlation between perfusion and portal venous hypertension? *Eur. Radiol.* 2017; 27 (10): 4173–4180. <http://doi.org/10.1007/s00330-017-4788-x>
14. Preibsch H., Spira D., Thaiss W.M. et al. Impact of transjugular intrahepatic portosystemic shunt implantation on liver perfusion measured by volume perfusion CT. *Acta Radiol.* 2018; 58 (10): 1167–1173. <https://doi.org/10.1177/0284185116685922>
15. Джураева Н.М., Ибадов Р.А., Ибрагимов С.Х., Абдухалимова Х.В., Акилова Г.Х. Перфузионная компьютерная томография – новые горизонты в диагностике заболеваний поджелудочной железы. *Вестник современной клинической медицины.* 2024; 17 (4): 108–116. [http://doi.org/10.20969/VSKM.2024.17\(4\).108-116](http://doi.org/10.20969/VSKM.2024.17(4).108-116)  
Djuraeva N.M., Ibadov R.A., Ibragimov S.Kh. et al. Perfusion Computer Tomography – New Horizons in the Diagnostics of Pancreatic Diseases. *Bulletin of Modern Clinical Medicine.* 2024; 17 (4): 108–116. [http://doi.org/10.20969/VSKM.2024.17\(4\).108-116](http://doi.org/10.20969/VSKM.2024.17(4).108-116) (In Russian)
16. Magzumova S., Isroilov U., Djuraeva N., Khaybullina Z. et al. Computed tomography angiography of liver alveococcosis: a case report. *J. Med. Case Rep.* 2024; 18 (1): 100. <http://doi.org/10.1186/s13256-024-04399-1>
17. Guan S., Zhao W.D., Zhou K.R. et al. CT perfusion at early stage of hepatic diffuse disease. *Wld J. Gastroenterol.* 2005; 11 (22): 3465–3467. <http://doi.org/10.3748/wjg.v11.i22.3465>



**Для корреспонденции\*:** Вахидова Наргиза Тулкиновна – sidikovan@yandex.ru

**Джуроева Нигора Мухсумовна** – доктор мед. наук, заведующая отделением МР и КТ ГУ “Республиканский специализированный научно-практический медицинский центр хирургии имени академика В. Вахидова”, Ташкент. <https://orcid.org/0000-0002-2232-8264>

**Вахидова Наргиза Тулкиновна** – канд. мед. наук, врач отделения МР и КТ ГУ “Республиканский специализированный научно-практический медицинский центр хирургии имени академика В. Вахидова”, Ташкент. <https://orcid.org/0009-0008-1276-8531>

**Амирхамзаев Айбек Турабаевич** – канд. мед. наук, врач отделения МР и КТ ГУ “Республиканский специализированный научно-практический медицинский центр хирургии имени академика В. Вахидова”, Ташкент.

**Абдухалимова Ханум Валентиновна** – канд. мед. наук, врач отделения МР и КТ ГУ “Республиканский специализированный научно-практический медицинский центр хирургии имени академика В. Вахидова”, Ташкент. <https://orcid.org/0000-0002-3294-4183>

**Султанов Алишер Тахирович** – врач отделения МР и КТ ГУ “Республиканский специализированный научно-практический медицинский центр хирургии имени академика В. Вахидова”, Ташкент.

**Хурсанова Дильнур Хошимовна** – докторант 2-го года обучения ГУ “Республиканский специализированный научно-практический медицинский центр хирургии имени академика В. Вахидова”, Ташкент.

**Миртаджиева Зилова Давранбековна** – докторант 2-го года обучения ГУ “Республиканский специализированный научно-практический медицинский центр хирургии имени академика В. Вахидова”, Ташкент.

**Магзумова Саодат Хабибуллаевна** – врач отделения МР и КТ ГУ “Республиканский специализированный научно-практический медицинский центр хирургии имени академика В. Вахидова”, Ташкент. <https://orcid.org/0000-0002-1137-4783>

**Contact\*:** Nargiza T. Vakhidova – sidikovan@yandex.ru

**Nigora M. Djuraeva** – Doct. of Sci. (Med.), Head of the MR and CT Department, Republican Specialized Scientific and Practical Medical Center for Surgery named after academician V. Vakhidov, Tashkent. <https://orcid.org/0000-0002-2232-8264>

**Nargiza T. Vakhidova** – Cand. of Sci. (Med.), Radiologist of the MR and CT department, Republican Specialized Scientific and Practical Medical Center for Surgery named after academician V. Vakhidov, Tashkent. <https://orcid.org/0009-0008-1276-8531>

**Aibek T. Amirkhamzaev** – Cand. of Sci. (Med.), Doctor of the MR and CT department, Republican Specialized Scientific and Practical Medical Center for Surgery named after academician V. Vakhidov, Tashkent.

**Khanum V. Abdukhalimova** – Cand. of Sci. (Med.), Radiologist of the MR and CT department, Republican Specialized Scientific and Practical Medical Center for Surgery named after academician V. Vakhidov, Tashkent. <https://orcid.org/0000-0002-3294-4183>

**Alisher T. Sultanov** – Radiologist of the MR and CT department, Republican Specialized Scientific and Practical Medical Center for Surgery named after academician V. Vakhidov, Tashkent.

**Dilnura Kh. Khursanova** – PhD student 2nd year of study, Republican Specialized Scientific and Practical Medical Center for Surgery named after academician V. Vakhidov, Tashkent.

**Zilola D. Mirtadzhieva** – PhD student 2nd year of study, Republican Specialized Scientific and Practical Medical Center for Surgery named after academician V. Vakhidov, Tashkent.

**Saodat Kh. Magzumova** – Doctor of the MR and CT department, Republican Specialized Scientific and Practical Medical Center for Surgery named after academician V. Vakhidov, Tashkent. <https://orcid.org/0000-0002-1137-4783>



ISSN 1607-0763 (Print); ISSN 2408-9516 (Online)

<https://doi.org/10.24835/1607-0763-1472>

# Исследование диагностической эффективности выявления метастазов в печени с использованием T1-взвешенного контрастного исследования с эффектом переноса намагниченности

© Санников М.Ю.<sup>1\*</sup>, Бородин О.Ю.<sup>1, 2</sup><sup>1</sup> ОГАУЗ «Томский областной онкологический диспансер»; 634009 Томск, пр. Ленина, 115, Российская Федерация<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Сибирский государственный медицинский университет» Минздрава России; 634050 Томск, Московский тракт, д. 2, Российская Федерация

**Цель исследования:** оценить диагностические возможности выявления метастатических очагов на постконтрастных изображениях при использовании эффекта переноса намагниченности с применением короткого липоспецифического преднасыщающего импульса.

**Материал и методы.** Материалом исследования являлись изображения динамической контрастной МРТ органов брюшной полости с метастатическим поражением печени. Параметры преднасыщающего импульса:  $\Delta f = -210$  Гц,  $FA = 600^\circ$ . Для каждого очага рассчитывали коэффициент контраста (КК) по формуле:  $KK = ((I_{\text{очаг}} - I_{\text{печень}}) / I_{\text{печень}}) \cdot 100\%$ . Васкуляризацию оценивали по шкале из трех категорий: гиповаскулярный, изоваскулярный и гипervasкулярный. Пороговые значения каждой категории рассчитывали с помощью кластерного анализа. Для оценки чувствительности выявления очаги были разделены на группы по размеру: 1-я – от 5 до 10 мм; 2-я – от 10 до 20 мм. Статистическую обработку результатов выполняли при помощи критериев Манна–Уитни, Вилкоксона, Кохрена и Мак-Немара.

**Результаты.** В ходе клинического исследования получены неоднородные по полу и возрасту группы пациентов в зависимости от характера васкуляризации очагов в печени при анализе артериальной фазы динамического контрастного усиления (ДКУ): гипervasкулярные ( $n = 14$ ) и гиповаскулярные ( $n = 38$ ), которым суммарно выполнено 52 исследования, так как у одного пациента был динамический контроль. Выявлено пороговое значение для группы гипervasкулярных метастазов:  $KK > 49,6\%$ . В 1-й группе (от 5 до 10 мм) чувствительность выявления очагов на постконтрастных изображениях T1-TSE-MTC составила 47,7%. Во 2-й группе диагностика очагов размером от 10 мм и более между постконтрастными изображениями T1-TSE-MTC и всеми фазами ДКУ статистически значимых различий не выявила ( $p < 0,0001$ ), а чувствительность составила 100%.

**Выводы.** 1. По данным кластерного анализа T1-взвешенное исследование на основе быстрого спинного эха с эффектом переноса намагниченности (T1-TSE-MTC) позволяет дифференцировать гипervasкулярные метастазы от переходных и гиповаскулярных ( $p < 0,05$ ).

2. Контрастность гипervasкулярных метастазов в постконтрастной фазе на изображениях T1-TSE-MTC значимо не отличается от артериальной фазы ДКУ ( $p > 0,05$ ).

3. Выявлена высокая чувствительность к усилению парамагнетиками в низких концентрациях на изображениях T1-TSE-MTC, которая снижает контрастность гиповаскулярных метастатических очагов размерами от 5 до 10 мм со значимым снижением их выявления в сравнении с ДКУ ( $p < 0,05$ ), а при размерах от 10 до 20 мм без значимых различий с ДКУ ( $p > 0,05$ ).

**Ключевые слова:** печень; метастазы; МРТ; перенос намагниченности

**Авторы подтверждают отсутствие конфликтов интересов.**

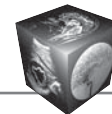
**Для цитирования:** Санников М.Ю., Бородин О.Ю. Исследование диагностической эффективности выявления метастазов в печени с использованием T1-взвешенного контрастного исследования с эффектом переноса намагниченности. *Медицинская визуализация*. 2025; 29 (1): 62–70.

<https://doi.org/10.24835/1607-0763-1472>

Поступила в редакцию: 16.04.2024.

Принята к печати: 22.09.2024.

Опубликована online: 17.01.2025.



# Study of diagnostic efficacy in detecting liver metastases using T1-weighted contrast-enhanced studies with magnetization transfer contrast effect

© Maxim Yu. Sannikov<sup>1\*</sup>, Oleg Yu. Borodin<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> Tomsk Regional Oncology Dispensary; 115, Lenin prospekt, Tomsk 634009, Russian Federation

<sup>2</sup> Siberian State Medical University; 2, Moskovskii trakt, Tomsk 634050, Russian Federation

**Objective:** to evaluate the diagnostic capabilities of detecting metastatic lesions on post-contrast images using magnetization transfer contrast with a short fat-suppressed presaturation pulse.

**Materials and methods.** The study material consisted of dynamic contrast-enhanced MR images of abdominal organs with metastatic liver involvement. Parameters of the pre-saturation pulse:  $\Delta f = -210$  Hz,  $FA = 600^\circ$ . Contrast ratio (CR) was calculated for each focus using a formula:  $CR = ((I_{foci} - I_{liver}) / I_{liver}) \cdot 100\%$ . Vascularization was assessed on a scale of 3 categories: hypovascular, isovascular, and hypervascular. Threshold values for each category were calculated using cluster analysis. To assess the sensitivity of focus detection, they were divided into groups by size: Group 1 – from 5 mm to 10 mm; Group 2 – from 10 mm to 20 mm. Statistical analysis of the results was performed using the Mann-Whitney, Wilcoxon, Cochran, and McNemar criteria.

**Results.** In the course of the clinical study, heterogeneous groups of patients were obtained in terms of gender and age depending on the nature of vascularization of liver foci during analysis of the arterial phase of DCE: hypervascular ( $n = 14$ ) and hypovascular ( $n = 38$ ), with a total of 52 studies conducted, as one patient had dynamic control. The threshold value for the group of hypervascular metastases was identified as  $CR > 49.6\%$ . In Group 1 (5 mm to 10 mm), the sensitivity of detecting foci on post-contrast images T-TSE-MTC was 47.7%. In Group 2, there were no statistically significant differences between the diagnosis of foci sized 10 mm or larger on post-contrast images T1-TSE-MTC and all phases of DCE ( $p < 0.0001$ ), with a sensitivity of 100%.

**Conclusions.** 1. According to cluster analysis, T1-weighted study based on fast spin echo with magnetization transfer contrast (T1-TSE-MTC) allows differentiation of hypervascular metastases from transitional and hypovascular ( $p < 0.05$ ).

2. The contrast of hypervascular metastases in the post-contrast phase on T1-TSE-MTC images does not significantly differ from the arterial phase of dynamic contrast enhancement (DCE) ( $p > 0.05$ ).

3. A high sensitivity to enhancement by paramagnetics at low concentrations on T1-TSE-MTC images was revealed, which reduces the contrast of hypovascular metastatic foci sized 5 to 10 mm with a significant decrease in their detection compared to DCE ( $p < 0.05$ ), while for sizes 10 to 20 mm, no significant differences with DCE were found ( $p > 0.05$ ).

**Keywords:** liver; metastases; MRI; magnetization transfer

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

**For citation:** Sannikov M.Yu., Borodin O.Yu. Study of diagnostic efficacy in detecting liver metastases using T1-weighted contrast-enhanced studies with magnetization transfer contrast effect. *Medical Visualization*. 2025; 29 (1): 62–70. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1472>

**Received:** 16.04.2024.

**Accepted for publication:** 22.09.2024.

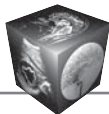
**Published online:** 17.01.2025.

## Введение

Метастазы в печени обнаруживаются у 25–50% пациентов с раком, что делает печень вторым по частоте поражения местом после лимфоузлов. Современные контрастные препараты увеличивают чувствительность магнитно-резонансной томографии (МРТ), особенно для очагов менее 10 мм, по сравнению с компьютерной томографией (КТ) [1–7]. Наивысший уровень достоверности в диагностике очагов более 1 см обеспечивается четырехфазной КТ и динамической МРТ [8]. По Барселонской классификации к очень ранней стадии (BCLC 0) относится опухоль размером ме-

нее 2 см, что подчеркивает важность улучшения контрастности при МРТ для очагов размером от 1 до 2 см.

Характер сосудистой васкуляризации метастатических очагов зависит от гистологического типа первичного рака и оценивается с помощью динамического контрастного усиления (ДКУ) в артериальную фазу. Это позволяет анализировать ответ на лечение [9]. Также существует изоваскулярный тип метастазов, не определяемый в артериальную фазу ДКУ, характерный для опухолей толстой кишки, щитовидной железы и эндометрия, а также у пациентов на химиотерапии [10].



Одним из способов увеличения контрастности очагов является использование жироподавляющих техник на основе эффекта переноса намагниченности в T1- и T2-взвешенных последовательностях [11–14]. Однако данные по этой технике ограничены и не дают ясных клинических рекомендаций. Недостаточно исследований о преднасыщающем импульсе для подавления жирового сигнала, а также по эффекту переноса намагниченности при отрицательных значениях частоты смещения [10, 15]. Не проводилось также клиническое изучение характера васкуляризации метастазов печени с использованием T1-взвешенных изображений с этой техникой.

**Цель исследования:** оценить диагностические возможности выявления метастатических очагов на постконтрастных изображениях при использовании эффекта переноса намагниченности с применением короткого липоспецифического преднасыщающего импульса.

### Материал и методы

Материалом послужили 52 МР-изображения органов брюшной полости с применением неспецифических гадолинийсодержащих контрастных препаратов с подтвержденными динамическим наблюдением в МРТ, КТ и УЗИ метастазами в печени из первичных опухолей различной локализации.

Клинические исследования проводились на высокопольном МР-томографе Toshiba Titan Octave с напряженностью магнитного поля 1,5 Тл с амплитудой градиентной системы 30 мТл/м и скоростью изменения напряженности магнитного поля 50 мТл/м/мс.

Мультипараметрическое сканирование органов брюшной полости с неспецифическим контрастным усилением включало в себя стандартный протокол исследования: T2-TSE, T2 TSE FatSat, T1 GR (FE\_dual) в фазе и противофазе, диффузионно-взвешенные изображения, а также ДКУ с получением артериальной, венозной и смешанной фаз (T1-3DFFE) на фоне болюсного введения парамагнетика в дозе 0,1 ммоль/кг массы пациента. Экспериментальная T1-взвешенная импульсная последовательность на основе 2D-TSE с применением эффекта переноса намагниченности (T1-TSE-MTC) выполнялась со следующими параметрами преднасыщающего импульса:  $df = -200$  Hz – смещение частоты,  $FA = 600^\circ$  – угол отклонения.

Каждый метастатический очаг в печени оценивался последовательно в каждой фазе ДКУ и на изображениях T1-TSE-MTC с расчетом коэффициента контраста (KK) по формуле:

$$KK = ((I_{\text{очаг}} - I_{\text{печень}}) / I_{\text{печень}}) \cdot 100\%,$$

где  $I_{\text{очаг}}$  – интенсивность изображения солидной части очага вторичных изменений,  $I_{\text{печень}}$  – интенсивность прилегающей паренхимы печени вокруг очага вторичных изменений после внутривенного контрастирования.

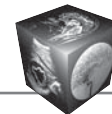
Для оценки васкуляризации метастатических очагов нами использована шкала из трех категорий на основе сравнения интенсивности очага относительно окружающей ткани печени в артериальную фазу ДКУ: гиповаскулярный (гипоинтенсивный или изоинтенсивный), гиперваскулярный (гиперинтенсивный). Для определения пороговых значений васкуляризации метастазов на изображениях T1-TSE-MTC провели кластерный анализ значений KK с разделением на 3 категории: гиповаскулярный, изоваскулярный и гиперваскулярный.

Оценка чувствительности выявления метастатических очагов на изображениях с переносом намагниченности проводилась относительно “золотого стандарта” диагностики очаговой патологии на основе изображений ДКУ. По результатам каждой фазы ДКУ в области печени оценивались очаги по длинному размеру и делились на группы: 1-я группа – от 5 до 10 мм; 2-я группа – от 10 до 20 мм. Все очаги, выявленные при ДКУ, принимались за “истину”. Качественная оценка выявления очаговых образований на изображениях T1-TSE-MTC относительно результатов ДКУ ранжировалась дихотомически: 1 – если очаг четко визуализировался и 0 – если очаг не визуализировался.

Обработка полученных данных осуществлялась в программе RadiAnt DICOM Viewer 4.2.1. В области метастатического очага обводилась зона интереса (ROI) не менее 0,3 см<sup>2</sup> и она выбиралась таким образом, чтоб исключить попадание некротических масс и кистозного компонента.

Статистическую обработку результатов выполняли при помощи программ SPSS 17.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, США) и MedCalc 12.1.14.0 (MedCalc Software, Mariakerke, Бельгия). При описании количественных показателей использовали медиану (Me) и межквартильные интервалы (25-й и 75-й процентиля) для совокупностей, не подчинявшихся закону нормального распределения. Достоверность межгрупповых различий величин оценивали при помощи непараметрического критерия Манна–Уитни. Для оценки различий зависимых совокупностей использовали парный критерий Вилкоксона. Для оценки выявляемости метастатических очагов применяли критерии Кохрена и Мак-Немара.

В связи с отсутствием истинно отрицательных и ложноположительных результатов диагностическая оценка выявления метастатических очагов на изображениях с переносом намагниченности



проводилась только с расчетом чувствительности по формуле:

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

где ИП – количество истинно положительных результатов, ЛО – количество ложноотрицательных результатов. За ИП-результат принималась отчетливая визуализация очага на трех из четырех фаз ДКУ, ЛО-результат – отсутствие или нечеткая визуализация очага на одной из фаз ДКУ и на последовательности с эффектом переноса намагниченности.

Во всех процедурах статистического анализа изменения считались достоверными при уровне значимости  $p < 0,05$ .

Клиническое исследование было одобрено локальным этическим комитетом НИИ кардиологии филиала ТНИМЦ РАН (протокол №150 от 16 ноября 2016 г.).

### Результаты исследования

В ходе клинического исследования получены неоднородные по полу и возрасту группы пациентов в зависимости от характера васкуляризации очагов в печени при анализе артериальной фазы ДКУ (по Braga L. и соавт., 2004): гипervasкулярные ( $n = 14$ ) и гиповаскулярные ( $n = 38$ ).

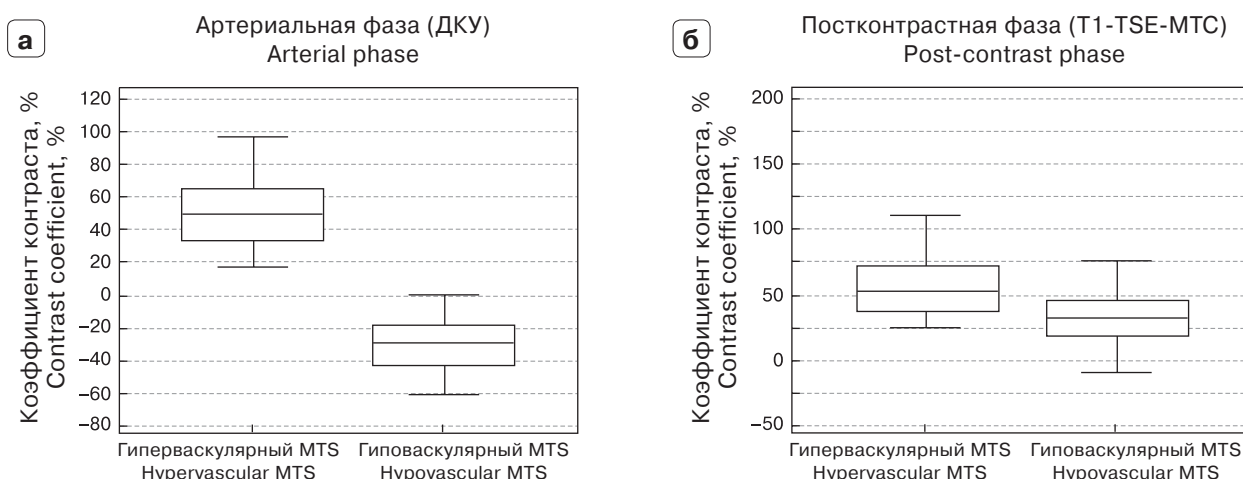
При сравнении коэффициентов контрастности в фазы ДКУ и в постконтрастную фазу T1-TSE-MTC независимых групп пациентов с гипervasкулярными и гиповаскулярными метастазами выявлено наличие статистически значимых различий КК при ДКУ в артериальную, венозную и смешанную

фазы, а также на изображениях с эффектом переноса намагниченности (критерий Манна–Уитни,  $p < 0,001$ ). В нативную фазу ДКУ статистически значимые различия между подгруппами пациентов с гипо- и гипervasкулярными очагами не выявлены ( $p = 0,16$ ), в артериальную фазу ДКУ хорошо видны высокие положительные значения в случае гипervasкулярных метастазов и низкие отрицательные значения у гиповаскулярных (рис. 1а). Вместе с тем на постконтрастных T1-взвешенных изображениях (ВИ) с эффектом переноса намагниченности (рис. 1б) определяется повышение контрастности гиповаскулярных метастазов выше 0, но значительно ниже гипervasкулярных ( $p = 0,0008$ ), что позволяет предположить возможность дифференциальной диагностики характера васкуляризации метастазов.

Проведен кластерный анализ коэффициентов контраста с разделением на 3 группы васкуляризации метастазов: гиповаскулярные, переходные, гипervasкулярные (рис. 2).

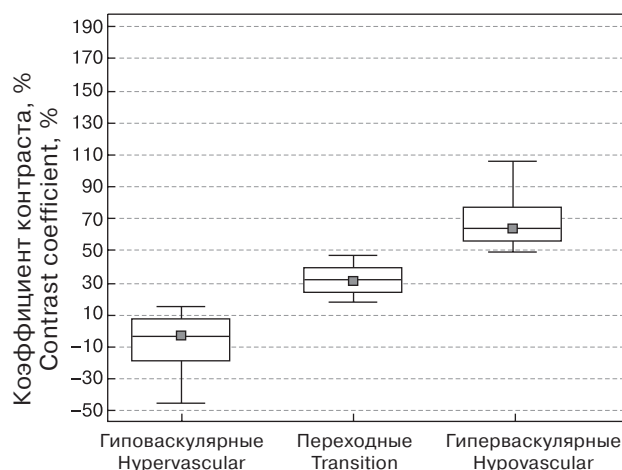
При выполнении ROC-анализа получено пороговое значение КК  $> 49,6$  диагностики гипervasкулярных метастазов (чувствительность – 60,8%; специфичность – 100%; рис. 3).

При неспецифическом контрастном усилении у пациентов с гиповаскулярными метастазами на изображениях ДКУ (рис. 4б, в, г) наблюдается слабое или изоинтенсивное накопление парамагнетика по периферии и в области внутренних перегородок, не отличающееся от контрастного усиления паренхимы печени. На T1ВИ с эффектом переноса намагниченности (T1-TSE-MTC) наблю-



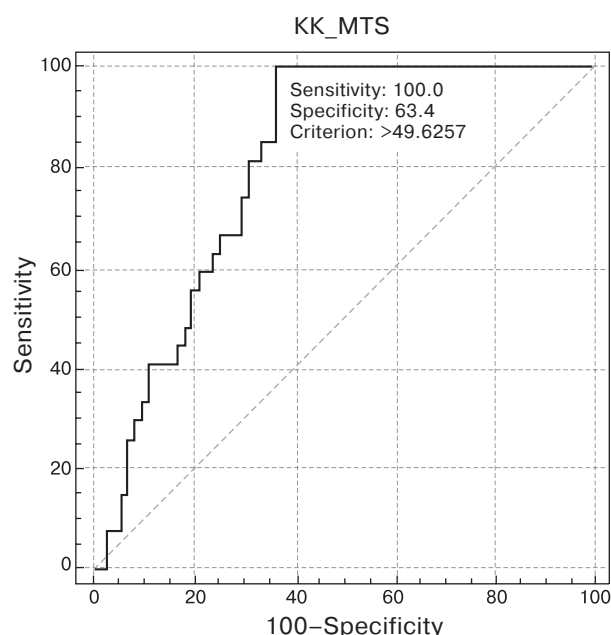
**Рис. 1.** Графики сравнения коэффициента контраста между гипervasкулярными и гиповаскулярными метастазами (MTS) в артериальную (а) и в постконтрастную фазу (б).

**Fig. 1.** Graphs comparing the contrast coefficient between hypervascular and hypovascular metastases (MTS) in the arterial phase (a) and in the post-contrast phase (b).



**Рис. 2.** Диаграмма значений коэффициента контраста на T1ВИ с эффектом переноса намагниченности (T1-TSE-MTC) после кластеризации характера васкуляризации метастазов печени: гиповаскулярных, переходных и гиперваскулярных.

**Fig. 2.** Diagram of contrast coefficient values on T1-weighted images with magnetization transfer effect (T1-TSE-MTC) after clustering the vascularization pattern of liver metastases: hypovascular, transitional, and hypervascular.



**Рис. 3.** ROC-анализ дифференциальной диагностики характера васкуляризации очаговых изменений в печени после проведения кластеризации: AUC = 0,805,  $p < 0,0001$ .

**Fig. 3.** ROC analysis of differential diagnosis of the vascularization pattern of focal liver lesions after clustering: AUC = 0.805,  $p < 0.0001$ .

дается более интенсивное контрастное усиление гиповаскулярных очагов по их периферии (рис. 4д).

При статистическом анализе коэффициентов контрастности гиповаскулярных метастазов (табл. 1) наблюдается низкое отрицательное значение во все фазы ДКУ без признаков значимых различий ( $p > 0,05$ ), а при парном сравнении с постконтрастной фазой на основе T1-TSE-MTC выявля-

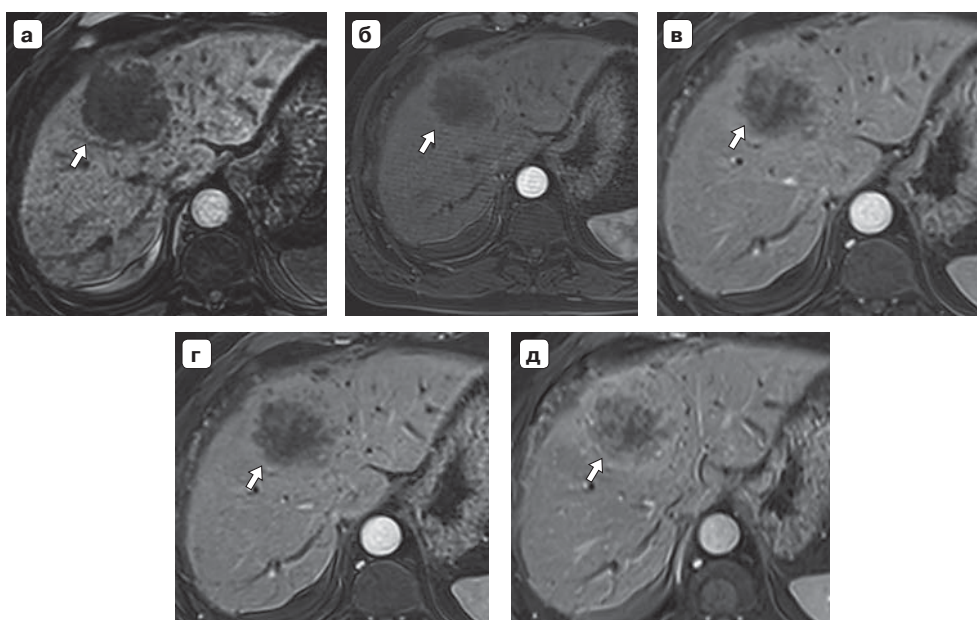
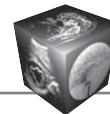
ны высокое положительное значение контрастности очага и его достоверные различия при парном сравнении с каждой фазой ДКУ ( $p < 0,0001$ ).

У пациентов с гиперваскулярными метастазами при ДКУ наблюдается высокоинтенсивное накопление парамагнетика в артериальную фазу по периферии очага (рис. 5). На постконтрастном T1ВИ (T1-TSE-MTC) на фоне подавленного

**Таблица 1.** Коэффициенты контрастности гиповаскулярных метастазов при ДКУ и на постконтрастных T1ВИ с эффектом переноса намагниченности (T1-TSE-MTC)

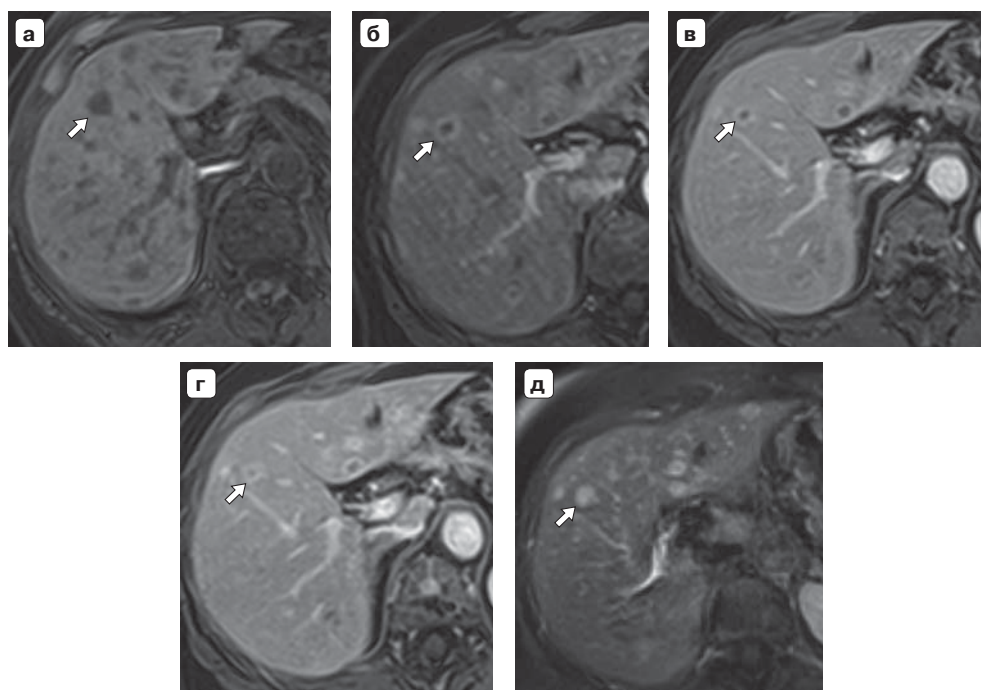
**Table 1.** Contrast enhancement coefficients of hypovascular metastases during dynamic contrast-enhanced imaging and on post-contrast T1 weighted images with magnetization transfer effect (T1-TSE-MTC)

| Фазы контрастирования ДКУ<br>Phases of dynamic contrast enhancement | Me, % | (Q25%;Q75%)    | Различия с постконтрастной фазой<br>Differences with the post-contrast phase |
|---------------------------------------------------------------------|-------|----------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Нативная / Native                                                   | -37.4 | (-43.2; -28.0) | $p < 0.0001$                                                                 |
| Артериальная / Arterial                                             | -29.1 | (-42.8; -19.1) | $p < 0.0001$                                                                 |
| Венозная / Venous                                                   | -40.4 | (-49.0; -22.9) | $p < 0.0001$                                                                 |
| Смешанная / Mixed                                                   | -30.3 | (-43.5; -21.1) | $p < 0.0001$                                                                 |
| Постконтрастная (T1-TSE-MTC)<br>Post-contrast (T1-TSE-MTC)          | 31.9  | (16.6; 44.4)   |                                                                              |



**Рис. 4.** Клиническое наблюдение пациента К., 55 лет. Динамическое контрастное усиление и последовательность с переносом намагниченности. Метастазы рака желудка (стрелки). **а** – нативная фаза; **б** – артериальная фаза; **в** – венозная фаза; **г** – смешанная фаза; **д** – T1-TSE-MTC.

**Fig. 4.** Clinical case of patient K., 55 years old. Dynamic contrast enhancement and magnetic resonance transfer sequence. Gastric cancer metastases (arrows). **a** – native phase; **б** – arterial phase; **в** – venous phase; **г** – mixed phase; **д** – T1-TSE-MTS.



**Рис. 5.** Клиническое наблюдение пациентки Ж., 61 год. Метастазы рака молочной железы в печень (стрелки). Неспецифическое динамическое контрастное усиление гипervasкулярных очагов печени и постконтрастное T1ВИ с эффектом переноса намагниченности. **а** – нативная фаза; **б** – артериальная фаза; **в** – венозная фаза; **г** – смешанная фаза; **д** – T1-TSE-MTC.

**Fig. 5.** Clinical case of patient Zh., 61 years old. Metastases of breast cancer in the liver (arrow). Nonspecific dynamic contrast enhancement of hypervasкулярных очагов печени и постконтрастное T1 weighted imaging with magnetization transfer effect. **a** – native phase; **б** – arterial phase; **в** – venous phase; **г** – mixed phase; **д** – T1-TSE-MTC.



**Таблица 2.** Коэффициенты контрастности гиперваскулярных метастазов при ДКУ и на постконтрастных T1ВИ с эффектом переноса намагниченности (T1-TSE-MTC)

**Table 2.** Contrast coefficients of hypervascular metastases in DCE and in post-contrast T1-MRI with magnetization transfer effect (T1-TSE-MTC)

| Фазы контрастирования<br>Phases of dynamic contrast enhancement | Me, % | (Q25%;Q75%)    | Различия с постконтрастной фазой<br>Differences with the post-contrast phase |
|-----------------------------------------------------------------|-------|----------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Нативная / Native                                               | –28.0 | (–40.2; –14.0) | $p < 0.0001$                                                                 |
| Артериальная / Arterial                                         | 48.8  | (33.4; 65.5)   | $p = 0.95$                                                                   |
| Венозная / Venous                                               | 13.3  | (0.2; 21.1)    | $p < 0.0001$                                                                 |
| Смешанная / Mixed                                               | 14.4  | (–2.8; 25.2)   | $p < 0.0001$                                                                 |
| Постконтрастная (T1-TSE-MTC)<br>Post-contrast(T1-TSE-MTC)       | 50.6  | (37.3; 71.0)   |                                                                              |

MP-сигнала от интактной ткани печени контрастные очаги визуализируются еще более интенсивными не только по периферии, но также отмечается контрастное усиление в области центральных отделов метастазов (рис. 5д).

При парном сравнении КК изображений метастатических очагов в каждую фазу ДКУ с постконтрастным T1-TSE-MTC (табл. 2) выявлены статистически значимые различия нативной, венозной и смешанной фаз ( $p < 0,0001$ ), а в артериальную фазу различий не выявлено ( $p = 0,95$ ).

Для оценки чувствительности выявляемости очагов между ДКУ и постконтрастными изображениями T1-TSE-MTC сравнивались 2 группы по размерам очагов: 1-я группа – от 5 до 10 мм ( $n = 107$ ) и 2-я группа – от 10 до 20 мм ( $n = 125$ ). При использовании критерия Кохрена выявлены различия в 1-й группе между постконтрастными изображениями с эффектом переноса намагниченности и всеми фазами ДКУ ( $p < 0,001$ ), а при попарном сравнении с помощью критерия Мак-Немара определены статистически значимые различия с каждой фазой ( $p < 0,0001$ ). В 1-й группе чувствительность выявления очагов на постконтрастных изображениях T-TSE-MTC составила 47,7%. Во 2-й группе диагностика очагов размером от 10 мм и более между постконтрастными изображениями T1-TSE-MTC и всеми фазами ДКУ статистически значимых различий не выявила ( $p < 0,0001$ ), а чувствительность составила 100%.

## Обсуждение

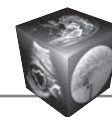
Изучение эффекта переноса намагниченности в МР-диагностике заболеваний печени сосредоточено на количественной детекции очаговых изменений, в то время как исследований качественных характеристик очагов мало. Большинство

работ посвящено диагностике диффузных изменений печени [8, 16, 17]. Наше исследование показало возможность визуализации гипо- и гиперваскулярных образований на фоне неспецифического контрастного усиления и установило критерии для дифференциальной диагностики между гиперваскулярными и гиповаскулярными образованиями с КК  $> 49,6$  по данным постконтрастных T1ВИ ( $p < 0,05$ ).

При неспецифическом динамическом контрастном усилении гиперваскулярные очаги лучше всего визуализируются в артериальную фазу, а на последующих фазах контрастность снижается ( $p < 0,05$ ). В постконтрастную фазу метастатические очаги сохраняют высокую контрастность на T1ВИ, не отличающуюся от артериальной ( $p > 0,05$ ). Гиповаскулярные метастазы демонстрируют низкие значения коэффициента контрастности во всех фазах [18–21]. Наше исследование подтверждает, что гиповаскулярные очаги слабо накапливают парамагнетик, и значительное повышение контрастности достигается только с помощью последовательности с эффектом переноса намагниченности ( $p < 0,05$ ). Этот эффект подтверждает высокую чувствительность T1ВИ к накоплению парамагнитного контрастного препарата в малых концентрациях, что не удалось достичь на обычных T1ВИ.

В нашей работе выявлена возможность оценки васкуляризации очагов с помощью последовательности с эффектом переноса намагниченности, что полезно для определения локализации первичного опухолевого процесса и оценки ответа на лечение.

Обнаружение метастазов в печени на ранней стадии критично для выживаемости, так как позволяет отбирать пациентов для операции. МРТ



превосходит другие методы визуализации благодаря высокому мягкотканному контрасту и специфичным контрастным веществам [22–25]. В нашем исследовании показана высокая чувствительность выявления метастазов от 10 до 20 мм с использованием T1ВИ в постконтрастную фазу на основе TSE с эффектом переноса намагниченности. При этом чувствительность для метастазов от 5 до 10 мм ниже, что указывает на большую способность T1-TSE-MTC к усилению с парамагнетиками в низких концентрациях по сравнению с 3D-FFE.

### Выводы

1. По данным кластерного анализа T1-взвешенное исследование на основе быстрого спинного эха с эффектом переноса намагниченности (T1-TSE-MTC) позволяет дифференцировать гипervasкулярные метастазы от переходных и гиповаскулярных ( $p < 0,05$ ).

2. Контрастность гипervasкулярных метастазов в постконтрастную фазу на изображениях T1-TSE-MTC значительно не отличается от артериальной фазы ДКУ ( $p > 0,05$ ).

3. Выявлена высокая чувствительность к усилению парамагнетиками в низких концентрациях на изображениях T1-TSE-MTC, которая снижает контрастность гиповаскулярных метастатических очагов размерами от 5 до 10 мм со значимым снижением их выявления в сравнении с ДКУ ( $p < 0,05$ ), а при размерах от 10 до 20 мм без значимых различий с ДКУ ( $p > 0,05$ ).

### Участие авторов

Санников М.Ю. – 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, участие в научном дизайне.

Бородин О.Ю. – концепция и дизайн исследования, анализ и интерпретация полученных данных, подготовка и редактирование текста, участие в научном дизайне, утверждение окончательного варианта статьи.

### Authors' participation

Sannikov M.Yu. – 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, participation in scientific design,

Borodin O.Yu. – concept and design of the study, analysis and interpretation of the obtained data, text preparation and editing, participation in scientific design, approval of the final version of the article.

### Список литературы [References]

1. Ломовцева К.Х., Кармазановский Г.Г. Диффузионно-взвешенные изображения при очаговой патологии печени: обзор литературы. *Медицинская визуализация*. 2015; 6: 50–60.  
Lomovtseva K.Kh., Karmazanovsky G.G. Diffusion-weighted images in focal liver pathology: a literature review. *Medical Visualization*. 2015; 6: 50–60. (In Russian)
2. Акчурина Э.Д. Диффузионно-взвешенные изображения в комплексной лучевой диагностике очаговых поражений печени: Автореф. ... дис. канд. мед. наук. М., 2011. 24 с.  
Akchurina E.D. Diffusion-weighted images in complex radiological diagnostics of focal liver lesions. Autoref. ... Dis. Cand. of Sci. (Med.). Moscow, 2011. 24 p. (In Russian)
3. Asato N., Tsurusaki M., Sofue K. et al. Comparison of gadoxetic acid-enhanced dynamic MR imaging and contrast-enhanced computed tomography for preoperative evaluation of colorectal liver metastases. *Jpn. J. Radiol.* 2017; 35 (4): 197–205.  
<http://doi.org/10.1007/s11604-017-0622-2>
4. Chen S.Z., Yuan J., Deng M. et al. Chemical exchange saturation transfer (CEST) MR technique for in-vivo liver imaging at 3.0 tesla. *Eur. Radiol.* 2016; 26 (6): 1792–800.  
<http://doi.org/10.1007/s00330-015-3972-0>
5. Lupescu I.G., Nicolae C.A., Pomohaci M. et al. Multiparametric MRI with gadoxetic acid (Primovist®) in oncological patients: current indications and utility of the hepatobiliary phase. *Oncolog-Hematolog.ro. Oncolog-Hematolog*. 2023. 64 (3): 11–14.
6. Choi S.H., Kim S.Y., Park S.H. et al. Diagnostic performance of CT, gadoxetate disodium-enhanced MRI, and PET/CT for the diagnosis of colorectal liver metastasis: Systematic review and meta-analysis. *J. Magn. Reson. Imaging*. 2018; 47 (5): 1237–1250.  
<http://doi.org/10.1002/jmri.25852>
7. van der Reijdt D.J., Chupetlovska K., van Dijk E. et al. Multi-sequence MRI radiomics of colorectal liver metastases: Which features are reproducible across readers? *Eur. J. Radiol.* 2024; 172: 111346.  
<http://doi.org/10.1016/j.ejrad.2024.111346>
8. Рак печени (гепатоцеллюлярный). Клинические рекомендации. Одобрено Научным советом Министерства здравоохранения Российской Федерации. М., 2020. 57 с. [https://oncology-association.ru/wp-content/uploads/2020/09/rak\\_pecheni.pdf?ysclid=m27xr4av1i458055995](https://oncology-association.ru/wp-content/uploads/2020/09/rak_pecheni.pdf?ysclid=m27xr4av1i458055995)  
Liver cancer (hepatocellular). Clinical guidelines. Approved by the Scientific Council of the Ministry of Health of the Russian Federation. Moscow, 2020. 57 p. [https://oncology-association.ru/wp-content/uploads/2020/09/rak\\_pecheni.pdf?ysclid=m27xr4av1i458055995](https://oncology-association.ru/wp-content/uploads/2020/09/rak_pecheni.pdf?ysclid=m27xr4av1i458055995) (In Russian)
9. Braga L., Semelka R.C., Pietrobon R. et al. Does hypervascularity of liver metastases as detected on MRI predict disease progression in breast cancer patients? *Am. J. Roentgenol.* 2004; 182 (5): 1207–1213.  
<http://doi.org/10.2214/ajr.182.5.1821207>
10. Semelka R.C., Helmlberger T.K. Contrast agents for MR imaging of the liver. *Radiology*. 2001; 218 (1): 27–38.  
<http://doi.org/10.1148/radiology.218.1.r01ja2427>
11. Berry I., Barker G.J., Barkhof F. et al. A multicenter measurement of magnetization transfer ratio in normal white matter. *J. Magn. Reson. Imaging*. 1999; 9 (3): 441–446.



- [http://doi.org/10.1002/\(sici\)1522-2586\(199903\)9:3<441::aid-jmri12>3.0.co;2-r](http://doi.org/10.1002/(sici)1522-2586(199903)9:3<441::aid-jmri12>3.0.co;2-r)
12. Чижилов В.И. Практикум по магнитному резонансу. СПб.: Изд-во С.-Петербургского университета, 2009. 254 с.  
Chizhikov V.I. Practical guide to magnetic resonance imaging. St. Petersburg: Publishing house of St. Petersburg University, 2009. 254 p. (In Russian)
  13. Ebrahimi B., Jiang K., Lerman L. Magnetization Transfer Imaging. In: Serai S.D., Darge K. (eds). Advanced Clinical MRI of the Kidney. Springer, Cham., 2023: 181–195. [http://doi.org/10.1007/978-3-031-40169-5\\_13](http://doi.org/10.1007/978-3-031-40169-5_13)
  14. Wáng Y.X.J., Dou W., Shen Z., Zhang Y. An update on liver chemical exchange saturation transfer imaging with a focus on clinical translation. *Quant. Imaging Med. Surg.* 2023; 13 (7): 4057–4076. <http://doi.org/10.21037/qims-23-379>
  15. Mahfouz M., Zaky I., Maher M. Magnetization Transfer Magnetic Resonance Imaging of Hepatic Tumors. *J. Egypt. Nat. Cancer Inst.* 2000; 12 (3) 191–198.
  16. Rosenkrantz A.B., Storey P., Gilet A.G. et al. Magnetization transfer contrast-prepared MR imaging of the liver: inability to distinguish healthy from cirrhotic liver. *Radiology.* 2012; 262 (1): 136–143. <http://doi.org/10.1148/radiol.11111043>
  17. Seo N., Jeong H.K., Choi J.Y. et al. Liver MRI with amide proton transfer imaging: feasibility and accuracy for the characterization of focal liver lesions. *Eur. Radiol.* 2021; 31 (1): 222–231. <http://doi.org/10.1007/s00330-020-07122-y>
  18. Choi J.Y., Choi J.S., Kim M.J. et al. Detection of hepatic hypovascular metastases: 3D gradient echo MRI using a hepatobiliary contrast agent. *J. Magn. Reson. Imaging.* 2010 Mar; 31 (3): 571–578. <http://doi.org/10.1002/jmri.22076>
  19. Maino C., Vernuccio F., Cannella R. et al. Liver metastases: The role of magnetic resonance imaging. *Wld J. Gastroenterol.* 2023; 29 (36): 5180–5197. <http://doi.org/10.3748/wjg.v29.i36.5180>
  20. Vernuccio F., Cannella R., Bartolotta T.V. et al. Advances in liver US, CT, and MRI: moving toward the future. *Eur. Radiol. Exp.* 2021; 5 (1): 52. <http://doi.org/10.1186/s41747-021-00250-0>
  21. Zhang L., Yu X., Huo L. et al. Detection of liver metastases on gadobenate dimeglumine-enhanced MRI: systematic review, meta-analysis, and similarities with gadoxetate-enhanced MRI. *Eur. Radiol.* 2019; 29 (10): 5205–5216. <http://doi.org/10.1007/s00330-019-06110-1>
  22. Mao Y., Chen B., Wang H. et al. Diagnostic performance of magnetic resonance imaging for colorectal liver metastasis: A systematic review and meta-analysis. *Sci. Rep.* 2020; 10 (1): 1969. <http://doi.org/10.1038/s41598-020-58855-1>
  23. Morin C., Drolet S., Daigle C. et al. Additional value of gadoxetic acid-enhanced MRI to conventional extracellular gadolinium-enhanced MRI for the surgical management of colorectal and neuroendocrine liver metastases. *HPB (Oxford).* 2020; 22 (5): 710–715. <http://doi.org/10.1016/j.hpb.2019.09.009>
  24. Hayoz R., Vietti-Viola N., Duran R. et al. The combination of hepatobiliary phase with Gd-EOB-DTPA and DWI is highly accurate for the detection and characterization of liver metastases from neuroendocrine tumor. *Eur. Radiol.* 2020; 30 (12): 6593–6602. <http://doi.org/10.1007/s00330-020-06930-6>
  25. Schnitzer M.L., Buchner J., Biechele G. et al. Economic evaluation of <sup>18</sup>F-FDG PET/CT, MRI and CE-CT in selection of colorectal liver metastases eligible for ablation – A cost-effectiveness analysis. *Eur. J. Radiol.* 2023; 163: 110803. <http://doi.org/10.1016/j.ejrad.2023.110803>

**Для корреспонденции\*:** Санников Максим Юрьевич – e-mail: sannikoff.maks@yandex.ru

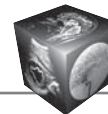
**Санников Максим Юрьевич** – врач-рентгенолог отделения рентгенодиагностики ОГАУЗ “Томский областной онкологический диспансер”, Томск.

**Бородин Олег Юрьевич** – доктор мед. наук, заведующий отделением рентгенодиагностики ОГАУЗ “Томский областной онкологический диспансер”; профессор кафедры биофизики и функциональной диагностики ФГБОУ ВО “Сибирский государственный медицинский университет” Минздрава России. Томск. <https://orcid.org/0000-0002-5031-1355>

**Contact\*:** Maxim Yu. Sannikov – e-mail: sannikoff.maks@yandex.ru

**Maxim Yu. Sannikov** – radiologist of the X-ray diagnostics department, Tomsk Regional Oncology Dispensary, Tomsk.

**Oleg Yu. Borodin** – Doct. of Sci. (Med.), Head of the X-ray diagnostics department, Tomsk Regional Oncology Dispensary; Professor of the Department of Biophysics and Functional Diagnostics, Siberian State Medical University, Tomsk. <https://orcid.org/0000-0002-5031-1355>



## Почки | Kidneys

ISSN 1607-0763 (Print); ISSN 2408-9516 (Online)

<https://doi.org/10.24835/1607-0763-1507>

## Возможность определения процентного отношения вклада почек в экскреторную функцию. Предварительные результаты

© Громов А.И.<sup>1,2</sup>, Доморовская Я.С.<sup>1\*</sup>, Сивков А.В.<sup>1</sup>, Просянных М.Ю.<sup>1</sup>,  
Войтко Д.А.<sup>1</sup>, Каприн А.Д.<sup>3,4</sup>, Алексеев Б.Я.<sup>3,5</sup>, Аполихин О.И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> НИИ урологии и интервенционной радиологии им. Н.А. Лопаткина – филиал ФГБУ “НМИЦ радиологии” Минздрава России; 105425 Москва, 3-я Парковая ул., д. 51, Российская Федерация

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО “Российский университет медицины” Минздрава России; 127006 Москва, ул. Долгоруковская, д. 4, Российская Федерация

<sup>3</sup> ФГБУ “Национальный медицинский исследовательский центр радиологии” Минздрава России; МНИОИ им. П. А. Герцена – филиал ФГБУ “НМИЦ радиологии” Минздрава России; 125284 Москва, 2-й Боткинский проезд, д. 3, Российская Федерация

<sup>4</sup> ФГАОУ ВО “Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы” Минобрнауки России; 117198 Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6, Российская Федерация

<sup>5</sup> ФГБОУ ВО “Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)” 125080 Москва, Волоколамское шоссе, д. 11, Российская Федерация

**Цель исследования:** определение возможности использования сегментации почек с получением данных об их объеме и плотностных характеристиках для оценки раздельной функции.

**Материал и методы.** Проанализированы данные 31 пациента, которым была выполнена нефросцинтиграфия и КТ-исследование почек с контрастированием. На рабочей станции с помощью программы Vitrea Advanced Visualization проведена сегментация обеих почек в нефрографическую фазу контрастирования. Полученные значения объема и коэффициента затухания рентгеновского излучения в единицах Хаунсфилда (ед.HU) для каждой почки перемножали, получая “массу” контрастного препарата. Поделив полученное значение каждой почки на их сумму и умножив на 100%, получали раздельный вклад каждой из почек в их общую экскреторную функцию в процентах. Для проверки необходимости введения в расчеты плотности паренхимы в нативную фазу исследования была измерена плотность паренхимы обеих почек на трех уровнях в нативную фазу, рассчитанное среднее арифметическое вычтено из средней плотности паренхимы почки в нефрографическую фазу. В дальнейшем производились те же расчеты для получения процентного вклада почек, что и до вычета нативной плотности. Нефросцинтиграфия выполнялась в различных лечебных учреждениях. Исследования проводились с соединениями технеция (<sup>99m</sup>Tc). Для дальнейшего анализа брались данные о процентном вкладе почек в их общую экскреторную функцию.

**Результаты.** Полученные данные о процентном вкладе почек в их общую экскреторную функцию, полученные при нефросцинтиграфии, сопоставлялись с расчетными данными КТ. Проведенный анализ показал очень высокую корреляцию и ковариацию этих результатов (коэффициент корреляции равен 0,99 ( $p < 0,001$ ), коэффициент ковариации равен 0,95 ( $p < 0,001$ )). При проведении корреляционного анализа результатов нефросцинтиграфии с данными КТ, где дополнительно вводилась поправка на нативную плотность паренхимы (она вычиталась из средней плотности паренхимы в нефрографическую фазу), результаты остались прежними: коэффициент корреляции составил 0,99 ( $p < 0,001$ ); коэффициент ковариации равен 0,95 ( $p < 0,001$ ).

**Выводы.** Разработан доступный и удобный в практической работе метод оценки раздельной функции почек. Метод не требует выполнения четко регламентированного временного протокола многофазной КТ. Оценке могут быть подвергнуты данные КТ, выполненной в любом лечебном учреждении. Метод не требует дополнительной оценки нативных денситометрических характеристик почек. Результаты, полученные при использовании метода, показали очень высокую корреляцию с данными динамической нефросцинтиграфии.

**Ключевые слова:** компьютерная томография; динамическая нефросцинтиграфия; функция почки; раздельная функция почек

**Авторы подтверждают отсутствие конфликтов интересов.**



**Для цитирования:** Громов А.И., Доморовская Я.С., Сивков А.В., Просьянников М.Ю., Войтко Д.А., Каприн А.Д., Алексеев Б.Я., Аполихин О.И. Возможность определения процентного отношения вклада почек в экскреторную функцию. Предварительные результаты. *Медицинская визуализация*. 2025; 29 (1): 71–79. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1507>

**Поступила в редакцию:** 11.10.2024. **Принята к печати:** 12.11.2024. **Опубликована online:** 23.01.2025.

# The ability to determine the percentage of kidney contribution to excretory function. Preliminary results

© Alexander I. Gromov<sup>1, 2</sup>, Yana S. Domorovskaya<sup>1\*</sup>, Andrey V. Sivkov<sup>1</sup>, Mikhail Yu. Prosyannikov<sup>1</sup>, Dmitry A. Voitko<sup>1</sup>, Andrey D. Kaprin<sup>3, 4</sup>, Boris Ya. Alekseev<sup>3, 5</sup>, Oleg I. Apolikhin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> N. Lopatkin Scientific Research Institute of Urology and Interventional Radiology – branch of the National Medical Research Radiological Center of the Ministry of Health of Russian Federation; 51, 3rd Parkovaya str., Moscow 105425, Russian Federation

<sup>2</sup> Russian University of Medicine of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation; 4, Dolgorukovskaya str., Moscow 127006, Russian Federation

<sup>3</sup> P. Hertsen Moscow oncology research institute – Branch of National Medical Research Radiological Centre of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation; 3, 2nd Botkinsky proezd, Moscow 125284, Russian Federation

<sup>4</sup> Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba; 6, Miklukho-Maklay str., Moscow 117198, Russian Federation

<sup>5</sup> Russian Biotechnological University; 11, Volokolamskoye shosse, Moscow 125080, Russian Federation

**Purpose.** Determination of the possibility of using kidney segmentation to obtain data on their volume and density characteristics to assess the split renal function.

**Material and methods.** The data of 31 patients who underwent nephroscintigraphy and CT examination of the kidneys with contrast were analyzed. Segmentation of both kidneys into the nephrographic phase of contrast was performed at the workstation using the Vitrea Advanced Visualization program. The obtained values of the volume were multiplied at the attenuation coefficient of X-ray radiation in Hounsfield units (HU) for each kidney to obtain the "mass" of the contrast preparation. Having divided the obtained value of each kidney by their sum value and multiplying by 100%, we obtained a split contribution of each kidney to their total excretory function in percentages. To verify the need to introduce parenchymal density into calculations in the native phase of the study, the density of the parenchyma of both kidneys was measured at three levels in the native phase, then, the calculated arithmetic mean was subtracted from the average density of the renal parenchyma in the nephrographic phase. Subsequently, the same calculations were performed to obtain the percentage contribution of the kidneys as before deducting the native density. Nephroscintigraphy was performed in various medical institutions. Studies were conducted with technetium compounds (<sup>99m</sup>Tc). For further analysis, data on the percentage contribution of each kidney to their overall excretory function were taken.

**Results.** The obtained data on the percentage contribution of the kidneys to their total excretory function obtained by nephroscintigraphy were compared with the calculated CT data. The analysis showed a very high correlation and covariance of these results (the correlation coefficient is 0.99 ( $p < 0.001$ ), the covariance coefficient is 0.95 ( $p < 0.001$ )). When conducting a correlation analysis of the results of nephroscintigraphy with CT data, where an additional correction was made for the native density of parenchyma (it was subtracted from the average density of parenchyma in the nephrographic phase), the results remained the same: the correlation coefficient was 0.99 ( $p < 0.001$ ); the covariance coefficient was 0.95 ( $p < 0.001$ ).

**Conclusions.** An accessible and practical method for evaluating split renal function has been developed. The method does not require the implementation of a clearly regulated time protocol for multiphase CT. CT data performed in any medical institution can be evaluated. The method does not require additional assessment of the native densitometric characteristics of the kidneys. The results obtained using the method showed a very high correlation with the data of dynamic nephroscintigraphy.

**Keywords:** computed tomography; dynamic nephroscintigraphy; renal function; split renal function

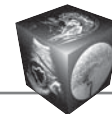
**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest. The study had no sponsorship.

**For citation:** Gromov A.I., Domorovskaya Ya.S., Sivkov A.V., Prosyannikov M.Yu., Voitko D.A., Kaprin A.D., Alekseev B.Ya., Apolikhin O.I. The ability to determine the percentage of kidney contribution to excretory function. Preliminary results. *Medical Visualization*. 2025; 29 (1): 71–79. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1507>

**Received:** 11.10.2024.

**Accepted for publication:** 12.11.2024.

**Published online:** 23.01.2025.



## Введение

В настоящее время в практической работе при необходимости оценки почечной функции применяются методы, основанные на лабораторном определении концентрации сывороточного креатинина с последующим использованием формул расчета скорости клубочковой фильтрации [1–3]. В подавляющем числе случаев такой подход полностью удовлетворяет практические потребности.

В то же время в некоторых клинических ситуациях, в частности при трансплантации почки, а также при планировании оперативных вмешательств, необходимо иметь данные о отдельной функции почек – процентном отношении вклада каждой из них в экскреторную функцию. Такую информацию можно получить на основании расчета клиренса эндо- или экзогенных маркеров при отдельном сборе мочи, в частности при наличии двух- или даже односторонней нефростомы. Но такие возможности существуют редко.

В настоящее время общепринятым методом оценки отдельной функции почек является динамическая нефросцинтиграфия. Она основана на регистрации транспорта через почки нефротропного фармпрепарата, меченного радионуклидом, после его внутривенного введения. Автоматический расчет скорости клубочковой фильтрации каждой почки, предлагаемый программными средствами гамма-камеры, позволяет определить их процентный вклад в общую экскреторную функцию. Однако нужно иметь в виду, что это отдельное диагностическое исследование, выполнение которого не всегда может быть легко организовано. Кроме того, исследование связано с дополнительной лучевой нагрузкой.

Тот факт, что рентгеноконтрастные препараты, так же как и основная масса нефротропных радиофармпрепаратов, выделяются из организма посредством клубочковой фильтрации, явился основанием для разработки методов оценки общей и отдельной функции почек при рентгеновском и тем более при КТ-исследовании. Понятно, что для определения показателей отдельной функции почек необходимо знать объем паренхимы каждой из почек, а также данные, характеризующие накопление ею контрастного препарата. Для этого нужно провести сегментацию паренхимы почек и определить денситометрические показатели.

Самые ранние работы по сегментации были трудоемки, связаны с расчетом площади паренхимы на каждом из КТ-срезов после ручного обведения [4, 5]. Конечно, такие способы не нашли своего применения в рутинной практике. Позже стали появляться различные программные средства (Voxar 3D Advanced, Leonardo Workstation, Advan-

tage Workstation Siemens, Vitrea Advanced Visualization, Amira 3D 5.4.5 и др.), способствующие упрощению измерений и подсчетов путем сначала ручной, потом полуавтоматической и автоматической сегментации паренхимы почки с получением данных об ее объеме и коэффициенте затухания рентгеновского излучения – КТ-плотности.

Возможность относительно легко сегментировать паренхиму почки позволила разработать несколько подходов к оценке отдельной функции почек. Однако каждый из них имел определенные ограничения для практического применения. В одних случаях показатели отдельной функции определялись после расчета скорости клубочковой фильтрации в каждой почке [6, 7], на основании вычислений интегралов плотности содержания контрастного вещества, распределенного в корковом, мозговом веществе и в мочевых путях почек [8–10]. В других случаях методика предполагала проведение КТ-исследования по жестко рекомендованному протоколу с четко определенными временными интервалами для сканирования [8, 11, 12]. В некоторых случаях расчеты усложнялись за счет необходимости определения денситометрических характеристик паренхимы почки при нативном сканировании [11–13]. Очень тщательно разработанный метод оценки общей и отдельной функции почек [8] требует иметь возможность использовать отдельное дорогостоящее коммерческое программное средство (Amira 3D). Указанное выше объясняет тот факт, что в настоящее время в практической работе при проведении КТ почек оценка их функционального состояния, в том числе отдельной их функции, не проводится. В подавляющем числе случаев оценивается лишь один качественный параметр – своевременность поступления контрастного препарата в верхние мочевые пути.

Поэтому, безусловно, остается интерес к разработке легкой в практическом использовании методики определения отдельной функции почек, которая не требовала бы обязательного строгого протокола сканирования и выполнялась бы программными средствами, имеющимися в комплекте компьютерного томографа.

**Цель исследования:** разработка рациональной, удобной в практическом применении методики оценки отдельной функции почек при проведении стандартной КТ почек с контрастированием.

## Материал и методы

Ретроспективно проанализированы данные 31 пациента, которым была выполнена нефросцинтиграфия и КТ-исследование органов брюшной полости и забрюшинного пространства с кон-



трастированием в период с 2023 по 2024 г. Среди обследованных были 20 мужчин и 11 женщин в возрасте от 3 до 77 лет (медиана – 60 лет, среднее арифметическое – 55,84 года).

Критериями включения являлись наличие у пациента двух функционирующих почек, наличие данных инструментальных обследований: динамическая нефросцинтиграфия и КТ почек с контрастированием с получением нефрографической фазы.

Критериями невключения являлись: отсутствие нативной или нефрографической фазы КТ-исследования, отсутствие процентного соотношения вклада почек по данным сцинтиграфии, наличие анатомически или функционально единственной почки, наличие подковообразной почки.

В процессе работы также были исключены 7 пациентов, у 3 из них была обнаружена крупная киста по задней поверхности почки, у 2 – образование по задней поверхности почки, у 2 – выраженная гидронефротическая трансформация почки ввиду возможного влияния на достоверность результатов нефросцинтиграфии.

По данным КТ, УЗИ и клинико-лабораторного обследования у больных были диагностированы: опухоли почек – 15, кисты почек – 8, пиелокаликектасия – 2, дивертикул чашечки почки – 1, опухоль мочеточника – 1, опухоль мочевого пузыря – 1, стриктура мочеточника – 1, дистопия почки – 1.

КТ проводилась в НИИ урологии и интервенционной радиологии им. Н.А. Лопаткина – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России на томографах Aquilion Prime SP (CANON MEDICAL SYSTEMS) – 16 исследований и Canon Aquilion ONE (GENESIS Edition) – 10 исследований. Кроме того, в работу было включено 5 исследований, произведенных на КТ-томографах в иных лечебных учреждениях.

Протокол многофазных КТ-исследований, проведенных в НИИ урологии, состоял из нативной, артериальной, нефрографической и отсроченной фаз со следующими параметрами: напряжение на трубке 120 кВ<sub>пик</sub>; скорость вращения 0,35 с; матрица, 512 × 512; максимальное количество срезов 160 (Aquilion Prime SP) и 640 (Canon Aquilion ONE); толщина среза 1 мм. Сначала была получена нативная серия изображений от верхней части диафрагмы до таза на вдохе. Затем контрастное вещество (350 мг Йоверскан или 370 мг Ультравист) вводили внутривенно со скоростью потока 4,0 мл/с в дозе 1,0 мл/кг. Сканирование артериальной фазы запускалось, когда плотность рентгеноконтрастного вещества в брюшной аорте достигала 100 HU. Нефрографическую фазу регистрировали через 50 с после регистрации артериальной фазы.

Цифровая обработка трехмерных изображений и измерения проведены на штатных рабочих станциях с помощью программы Vitrea Advanced Visualization. Измерения и последующие расчеты выполнены исследователем, не имевшим данных о результатах динамической нефросцинтиграфии.

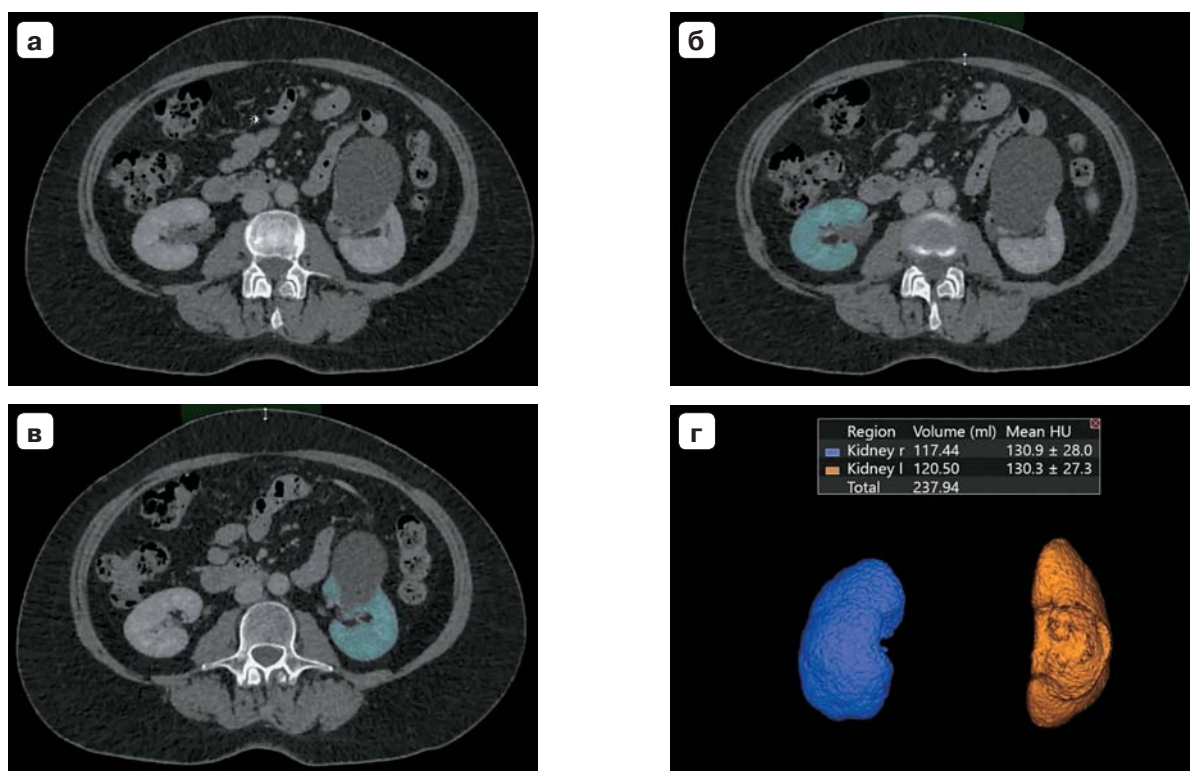
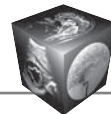
Для анализа использовалась нефрографическая фаза контрастирования.

На аксиальном срезе регулировалось окно визуализации так, чтобы почечная паренхима была визуально максимально контрастной относительно рядом расположенных органов. С помощью инструмента “Organ” щелчками по паренхиме почки, начиная с одного из полюсов, где почка максимально отделена от всех тканей, и продвигаясь к противоположному полюсу, выделялась (сегментировалась) вся почка. При захвате соседних тканей (органов или сосудов) использовался инструмент “Edit”, позволяющий посрезово убирать лишние области, не входящие в область паренхимы почки. После сегментации почек использовали функцию “Show Volume”, при этом программа самостоятельно подсчитывала и отображала объем (V) и среднюю плотность (HU) каждой почки (рис. 1).

В дальнейшем полученный объем и средние значения коэффициента затухания рентгеновского излучения – плотности в единицах Хаунсфилда (HU) для каждой почки перемножали, получая “массу” контрастного препарата. “Массу” обеих почек складывали и на полученную сумму делили “массу” правой почки, затем левой почки. Полученные результаты для правой и левой почки умножали на 100%, получая отдельный вклад каждой из почек в их общую экскреторную функцию в процентах.

Для проверки необходимости введения в расчеты данных о плотности паренхимы в нативную фазу исследования была измерена плотность паренхимы обеих почек на трех уровнях в нативную фазу (рис. 2), рассчитано среднее арифметическое и это число вычтено из средней плотности паренхимы почки в нефрографическую фазу. В дальнейшем производились те же расчеты для получения процентного вклада почек, что и до вычета нативной плотности.

Нефросцинтиграфия выполнялась в различных лечебных учреждениях. Исследования проводились с соединениями технеция (<sup>99m</sup>Tc) (пентатех, <sup>99m</sup>Tc, пирфотех <sup>99m</sup>Tc), фильтрующимися исключительно клубочками почек. Полученные данные о процентном вкладе почек в их общую экскреторную функцию сопоставлялись с данными КТ.



**Рис. 1.** Сегментация паренхимы почек пациента А. **а** – аксиальный срез в нативную фазу исследования; **б** – процесс сегментации правой почки в нефрографическую фазу контрастирования; **в** – процесс сегментации левой почки в нефрографическую фазу контрастирования; **г** – результат сегментации с помощью Vitrea Advanced Visualization с автоматическим расчетом объема и плотности паренхимы.

**Fig. 1.** Segmentation of the renal parenchyma of patient A. **a** – axial section in the native phase of the study; **б** – the process of segmentation of the right kidney into the nephrographic phase of contrast; **в** – the process of segmentation of the left kidney into the nephrographic phase of contrast; **г** – the result of segmentation using Vitrea Advanced Visualization with automatic calculation of the volume and density of the parenchyma.



**Рис. 2.** Измерение плотности паренхимы почки пациента А. **а** – процесс измерения плотности паренхимы правой почки в нативную фазу исследования на уровне верхнего полюса; **б** – процесс измерения плотности паренхимы правой почки в нативную фазу исследования на уровне ворот почки; **в** – процесс измерения плотности паренхимы правой почки в нативную фазу исследования на уровне нижнего полюса.

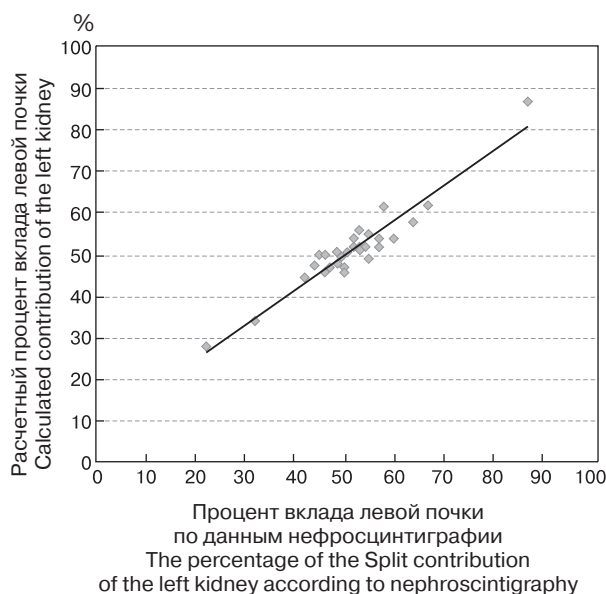
**Fig. 2.** Measurement of the density of the renal parenchyma of patient A. **a** – the process of measuring the density of the parenchyma of the right kidney in the native phase of the study at the level of the upper pole; **б** – the process of measuring the density of the parenchyma of the right kidney in the native phase of the study at the level of the kidney gate; **в** – the process of measuring the density of the parenchyma of the right kidney in the native phase of the study at the level of the lower pole.



## Результаты исследования

Наше исследование проведено для подтверждения гипотезы, что процентное соотношение “массы” контрастного вещества в паренхиме почек может быть использовано для определения их отдельной функции. Для этого данные о процентном вкладе почек в общую экскреторную функцию, полученные по разработанной методике, сравнивали со значениями процентного отношения вклада почек, определенными при динамической нефросцинтиграфии. Был проведен корреляционный анализ (рис. 3). Были взяты данные о процентном вкладе левой почки, что достаточно для определения корреляционных связей. Ведь процентный вклад второй (правой) почки равен 100% минус процент вклада левой почки. Полученное значение коэффициента корреляции составило 0,99 ( $p < 0,001$ ); коэффициента ковариации – 0,95 ( $p < 0,001$ ).

При проведении корреляционного анализа результатов нефросцинтиграфии с данными КТ, где дополнительно вводилась поправка на нативную плотность паренхимы (она вычиталась из средней плотности паренхимы в нефрографическую фазу), результаты остались прежними: коэффициент корреляции составил 0,99 ( $p < 0,001$ ); коэффициент ковариации равен 0,95 ( $p < 0,001$ ) (рис. 4).



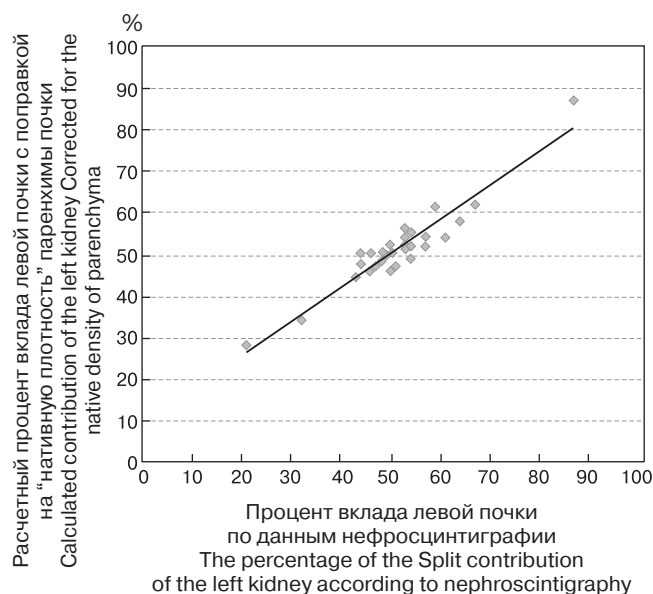
**Рис. 3.** Корреляция расчетного вклада левой почки по данным КТ и процентного вклада левой почки по данным нефросцинтиграфии.

**Fig. 3.** Correlation of the calculated contribution of the left kidney according to CT data and the percentage contribution of the left kidney according to nephrosцинтиграфии.

## Обсуждение

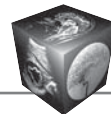
Нами предложен легкий в исполнении, удобный метод оценки отдельной функции почек [14]. Преимуществом его является техническая простота выполнения с небольшим объемом действий, позволяющих внедрить его в рутинную работу врача-рентгенолога.

Данный метод предполагает использование стандартных инструментов сегментации органов, имеющихся в рабочих станциях, которыми оснащаются современные компьютерные томографы. Такие возможности есть в программном обеспечении большинства производителей. Время, которое тратится врачом для сегментации обеих почек, составляет в большинстве случаев 1–2 мин. При этом получают данные об объеме каждой почки и средних значениях плотности их паренхимы. Расчет процентного вклада каждой почки очень простой и не требует обязательного наличия даже калькулятора. Эти данные в совокупности с результатами оценки скорости клубочковой фильтрации на основании использования расчетных формул, учитывающих уровень сывороточного креатинина, позволяют в подавляющем числе случаев иметь удовлетворяющие клиническую практику сведения об общей и отдельной функции почек. Нужно обратить внимание на то, что



**Рис. 4.** Корреляция расчетного вклада левой почки с поправкой на нативную плотность паренхимы и процентного вклада левой почки по данным нефросцинтиграфии.

**Fig. 4.** Correlation of the calculated contribution of the left kidney corrected for the native density of parenchyma and the percentage contribution of the left kidney according to nephrosцинтиграфии.



в каждом многофазном КТ-исследовании имеются скрытые важные количественные функциональные данные, которые остаются неоцененными в подавляющем числе проведенных КТ. При этом нужно отметить, что метод не требует проведения исследования со строго ограниченными временными интервалами сканирования при многофазном протоколе. Более того, он позволяет оценить раздельную функцию почек на основании ретроспективной оценки результатов КТ, представленных на носителях, после проведения исследования в другом учреждении. Для этого нужно загрузить данные нефрографической фазы сканирования в рабочую станцию томографа.

Проведенные нами сопоставления полученных данных с результатами динамической нефросцинтиграфии у этих же больных показали очень высокую корреляцию и ковариацию (коэффициент корреляции равен 0,99 ( $p < 0,001$ ), коэффициент ковариации равен 0,95 ( $p < 0,001$ )).

Когда мы начинали разработку данной методики, то, конечно, понимали, что для получения значений “массы” контрастного вещества в почке необходимо учитывать значения нативной плотности, которая должна вычитаться из плотности паренхимы в нефрографическую фазу. Для того чтобы понять, насколько учет нативной плотности влияет на точность оценки раздельной функции почек, мы провели дополнительный корреляционный анализ, где в учет бралась плотность паренхимы с поправкой на нативную плотность. Результаты такого анализа не показали повышения коэффициентов корреляции и ковариации. Таким образом в практической работе можно использовать только данные, полученные при сегментации в нефрографическую фазу КТ без потери точности расчета.

Разнообразие патологий в данной выборке пациентов позволило продемонстрировать ширину применения метода. И хотя, конечно, сегментация паренхимы почки при наличии в ней опухолей, при атрофических изменениях и в некоторых других случаях требует несколько большего времени, все равно это вполне выполнимо в обычной практической работе. Ограничением методики является гидронефротическая трансформация почки с выраженным истончением паренхимы. Однако стоит заметить, что и для оценки функции почки при нефросцинтиграфии у пациентов с данной патологией используют отдельные протоколы исследования.

Таким образом, предложенный метод оценки раздельной функции почек при КТ может с успехом использоваться в обычной практической работе.

## Выводы

1. Разработан доступный и удобный в практической работе метод оценки раздельной функции почек (процентного вклада каждой из почек в их общую экскреторную функцию).

2. Метод не требует выполнения четко регламентированного временного протокола многофазной КТ. Оценке могут быть подвергнуты данные КТ, выполненной в стороннем лечебном учреждении, представленные на носителях.

3. Метод не требует дополнительной оценки нативных плотностных характеристик почек.

4. Результаты, полученные при использовании метода, показали очень высокую корреляцию с данными динамической нефросцинтиграфии – методом, который в настоящее время считается эталоном оценки раздельной функции почек.

5. Применение разработанного метода в практике позволит во многих случаях избежать необходимости дополнительного выполнения нефросцинтиграфии, что, в свою очередь, может помочь снизить финансовые затраты и лучевую нагрузку на пациента, уменьшить время на подготовку больного к лечению.

## Участие авторов

Громов А.И. – концепция и дизайн исследования, анализ и интерпретация полученных данных, подготовка и редактирование текста, утверждение окончательного варианта статьи.

Доморовская Я.С. – проведение исследования, обзор публикаций по теме статьи, анализ и интерпретация полученных данных, написание текста.

Сивков А.В. – участие в научном дизайне, концепция и дизайн исследования, утверждение окончательного варианта статьи.

Просянкин М.Ю. – участие в научном дизайне, сбор и обработка данных, утверждение окончательного варианта статьи.

Войтко Д.А. – участие в научном дизайне, сбор и обработка данных.

Каприн А.Д. – участие в научном дизайне.

Алексеев Б.Я. – участие в научном дизайне.

Аполихин О.И. – участие в научном дизайне.

## Authors' participation

Gromov A.I. – 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.

Domorovskaya Ya.S. – conducting research, review of publications, analysis and interpretation of the obtained data, writing text.

Sivkov A.V. – participation in scientific design, concept and design of the study, approval of the final version of the article.



Prosyannikov M.Yu. – participation in scientific design, collection and analysis of data, approval of the final version of the article.

Voitko D.A. – participation in scientific design, collection and analysis of data.

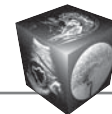
Kaprin A.D. – participation in scientific design.

Alekseev B.Ya. – participation in scientific design.

Apolikhin O.I. – participation in scientific design.

## Список литературы [References]

1. Levey A.S., Stevens L.A., Schmid C.H. et al.; CKD-EPI (Chronic Kidney Disease Epidemiology Collaboration). A new equation to estimate glomerular filtration rate. *Ann. Intern. Med.* 2009; 150 (9): 604–612. <https://doi.org/10.7326/0003-4819-150-9-200905050-00006>. Erratum in: *Ann Intern Med.* 2011; 155 (6): 408. PMID: 19414839; PMCID: PMC2763564
2. Национальные рекомендации. Хроническая болезнь почек: основные принципы скрининга, диагностики, профилактики и подходы к лечению. С.Пб.: Левша, 2012. 51 с.  
National recommendations. Chronic kidney disease: basic principles of screening, diagnosis, prevention and treatment approaches. SPb: Levsha. 2012. 51 p. (In Russian)
3. Клинические рекомендации. Хроническая болезнь почек (ХБП). *Нефрология*. 2021; 25 (5): 10–82. <https://doi.org/10.36485/1561-6274-2021-25-5-10-82>  
Clinical recommendations. Chronic kidney disease (CKD). *Nephrology*. 2021; 25 (5): 10–82. <https://doi.org/10.36485/1561-6274-2021-25-5-10-82> (In Russian)
4. Dawson P., Peters M. Dynamic contrast bolus computed tomography for the assessment of renal function. *Invest. Radiol.* 1993; 28 (11): 1039–1042. <https://doi.org/10.1097/00004424-199311000-00014>
5. Tsushima Y., Blomley M.J., Okabe K. et al. Determination of glomerular filtration rate per unit renal volume using computerized tomography: correlation with conventional measures of total and divided renal function. *J. Urology*. 2001; 165: 382–385. <https://doi.org/10.1097/00005392-200102000-00007>
6. Diez A., Powelson J., Sundaram C.P. et al. Correlation between CT-based measured renal volumes and nuclear-renalography-based split renal function in living kidney donors. Clinical diagnostic utility and practice patterns. *Clin. Transplant.* 2014; 28 (6): 675–682. <https://doi.org/10.1111/ctr.12365>
7. Wahba R., Franke M., Hellmich M. et al. Computed Tomography Volumetry in Preoperative Living Kidney Donor Assessment for Prediction of Split Renal Function. *Transplantation*. 2016; 100 (6): 1270–1277. <https://doi.org/10.1097/tp.0000000000000889>
8. Аляев Ю.Г., Дзеранов Н.К., Хохлачев С.Б., Борисов В.В., Фиев Д.Н., Демидко Ю.Л., Проскура А.В., Юрова М.В. Новый метод оценки раздельной функции почек на основании данных мультиспиральной компьютерной томографии с контрастированием. *Urology*. 2018; 2: 26–33. <https://doi.org/10.18565/urology.2018.2.26-33>
9. Аляев Ю.Г., Дзеранов Н.К., Хохлачев С.Б. et al. A new method for evaluating separate kidney function based on multispiral computed tomography with contrast. *Urology*. 2018; 2: 26–33. <https://doi.org/10.18565/urology.2018.2.26-33> (In Russian)
9. Аляев Ю.Г., Хохлачев С.Б., Фиев Д.Н. et al. A new approach for split renal function evaluation of glomerular filtration rate, perfusion and plasma flow by numerical analysis of 3D MSCT-based models. *REJR*. 2018; 8 (2): 105–109. [https://doi.org/10.1016/s1569-9056\(18\)31068-6](https://doi.org/10.1016/s1569-9056(18)31068-6)
10. Фиев Д.Н., Хохлачев С.Б., Борисов В.В., Саенко В.С., Демидко Ю.Л., Черненький М.М., Проскура А.В., Пузаков К.Б., Ларцова Е.В., Потолдыкова Н.В., Иноятов Ж.Ш., Аляев Ю.Г. Результаты анализа структурно-функционального состояния почек методом математической обработки данных МСКТ с контрастированием у пациентов с мочекаменной болезнью. *Урология*. 2019; 5: 72–78. <https://doi.org/10.18565/urology.2019.5.72-78>  
Fiev D.N., Khokhlachev S.B., Borisov V.V. et al. The results of the analysis of the structural and functional state of the kidneys by the method mathematical processing of MSCT data with contrast in patients with urolithiasis. *Urology*. 2019; 5: 72–78. <https://doi.org/10.18565/urology.2019.5.72-78>
11. Shi W., Liang X., Wu N. et al. Assessment of Split Renal Function Using a Combination of Contrast-Enhanced CT and Serum Creatinine Values for Glomerular Filtration Rate Estimation. *Am. J. Roentgenol.* 2020; 215 (1): 142–147. <https://doi.org/10.2214/ajr.19.22125>
12. Fowler J.C., Beadsmoore C., Gaskarth M.T. et al. A simple processing method allowing comparison of renal enhancing volumes derived from standard portal venous phase contrast-enhanced multidetector CT images to derive a CT estimate of differential renal function with equivalent results to nuclear medicine quantification. *Br. J. Radiol.* 2006; 79 (948): 935–942. <https://doi.org/10.1259/bjr/53140218>
13. Summerlin A.L., Lockhart M.E., Strang A.M. et al. Determination of split renal function by 3D reconstruction of CT angiograms: a comparison with gamma camera renography. *Am. J. Roentgenol.* 2008; 191 (5): 1552–1558. <https://doi.org/10.2214/ajr.07.4023>
14. Каприн А.Д., Алексеев Б.Я., Аполихин О.И., Сивков А.В., Громов А.И., Просянников М.Ю., Войтко Д.А., Доморовская Я.С. Способ определения процентного отношения вклада почек в экскреторную функцию. Изобретения полезные модели. Официальный бюллетень федеральной службы по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ). №28-2023. Патент на изобретение №2804579.  
Kaprin A.D., Alekseev B.Ya., Apolikhin O.I. et al. Method for determining the percentage of kidney contribution to excretory function. Inventions and utility models. The official bulletin of the Federal Service for Intellectual Property (ROSPATENT). №28-2023. Patent for invention No. 2804579 (In Russian)



**Для корреспонденции\*:** Доморовская Яна Сергеевна – e-mail: yana.domorovskaya@mail.ru

**Громов Александр Игоревич** – доктор мед. наук, профессор, руководитель группы лучевых методов диагностики и лечения отдела онкоурологии НИИ урологии и интервенционной радиологии им. Н.А. Лопаткина – филиала ФГБУ “НМИЦ радиологии” Минздрава России; профессор кафедры лучевой диагностики ФГБОУ ВО “Российский университет медицины” Минздрава России; Москва. <https://orcid.org/0000-0002-9014-9022>

**Доморовская Яна Сергеевна** – врач-рентгенолог НИИ урологии и интервенционной радиологии им. Н.А. Лопаткина – филиала ФГБУ “НМИЦ радиологии” Минздрава России, Москва. <https://orcid.org/0009-0001-7686-1718>

**Сивков Андрей Владимирович** – канд. мед. наук, заместитель директора по науке НИИ урологии и интервенционной радиологии им. Н.А. Лопаткина – филиала ФГБУ “НМИЦ радиологии” Минздрава России, Москва. <https://orcid.org/0000-0001-8852-6485>

**Просяников Михаил Юрьевич** – канд. мед. наук, заведующий отделом мочекаменной болезни НИИ урологии и интервенционной радиологии им. Н.А. Лопаткина – филиала ФГБУ “НМИЦ радиологии” Минздрава России, Москва. <https://orcid.org/0000-0003-3635-5244>

**Войтко Дмитрий Алексеевич** – канд. мед. наук, научный сотрудник отдела мочекаменной болезни НИИ урологии и интервенционной радиологии им. Н.А. Лопаткина – филиала ФГБУ “НМИЦ радиологии” Минздрава России, Москва. <https://orcid.org/0000-0003-1292-1651>

**Каприн Андрей Дмитриевич** – академик РАН, доктор мед. наук, профессор, генеральный директор ФГБУ “НМИЦ радиологии” Минздрава России; заведующий кафедрой урологии и оперативной нефрологии с курсом онкоурологии медицинского факультета медицинского института ФГАОУ ВО “Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы” Минобрнауки России, Москва. <https://orcid.org/0000-0001-8784-8415>

**Алексеев Борис Яковлевич** – доктор мед. наук, профессор, заместитель генерального директора по научной работе ФГБУ “НМИЦ радиологии” Минздрава России, Москва. <https://orcid.org/0000-0002-3398-4128>

**Аполихин Олег Иванович** – член-корр. РАН, доктор мед. наук, профессор, директор НИИ урологии и интервенционной радиологии им. Н.А. Лопаткина – филиала ФГБУ “НМИЦ радиологии” Минздрава России, Москва. <https://orcid.org/0000-0003-0206-043X>

**Contact\*:** Yana S. Domorovskaya – e-mail: yana.domorovskaya@mail.ru

**Alexander I. Gromov** – Doct. of Sci. (Med.), Professor, Head of the radiation diagnosis and treatment methods, Oncourology Department, N.A. Lopatkin Scientific Research Institute of Urology and Interventional Radiology – branch of the National Medical Research Radiological Center of the Ministry of Health of Russian Federation; Professor of Russian University of Medicine of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation; Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-9014-9022>

**Yana S. Domorovskaya** – radiologist at the N.A. Lopatkin Scientific Research Institute of Urology and Interventional Radiology – branch of the National Medical Research Radiological Center of the Ministry of Health of Russian Federation, Moscow. <https://orcid.org/0009-0001-7686-1718>

**Andrey V. Sivkov** – Cand. of Sci. (Med.), Deputy Director for Science of the N.A. Lopatkin Scientific Research Institute of Urology and Interventional Radiology – branch of the National Medical Research Radiological Center of the Ministry of Health of Russian Federation, Moscow. <https://orcid.org/0000-0001-8852-6485>

**Mikhail Yu. Prosyannikov** – Cand. of Sci. (Med.), Head of the Department of Urolithiasis at the N.A. Lopatkin Scientific Research Institute of Urology and Interventional Radiology – branch of the National Medical Research Radiological Center of the Ministry of Health of Russian Federation, Moscow. <https://orcid.org/0000-0003-3635-5244>

**Dmitry A. Voitko** – Cand. of Sci. (Med.), Researcher at the Department of Urolithiasis of the N.A. Lopatkin Scientific Research Institute of Urology and Interventional Radiology – branch of the National Medical Research Radiological Center of the Ministry of Health of Russian Federation, Moscow. <https://orcid.org/0000-0003-1292-1651>

**Andrey D. Kaprin** – Full Member of the Russian Academy of Sciences, Doct. of Sci. (Med.), Professor, Director of National Medical Research Radiological Center of the Ministry of Health of Russian Federation; Head of Department of urology and surgical nephrology with a course of oncurology at the medical faculty of medical institute of the Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow. <https://orcid.org/0000-0001-8784-8415>

**Boris Ya. Alekseev** – Doct. of Sci. (Med.), Professor, Deputy Director General for Scientific Work of the National Medical Research Radiological Center of the Ministry of Health of Russian Federation, Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-3398-4128>

**Oleg I. Apolikhin** – Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doct. of Sci. (Med.), Professor, Director of the N.A. Lopatkin Scientific Research Institute of Urology and Interventional Radiology – branch of the National Medical Research Radiological Center of the Ministry of Health of Russian Federation, Moscow. <https://orcid.org/0000-0003-0206-043X>



ISSN 1607-0763 (Print); ISSN 2408-9516 (Online)  
<https://doi.org/10.24835/1607-0763-1501>

## Эластография паренхимы почек у здоровых пациентов (обзор литературы)

© Маджугин М.Л.<sup>1\*</sup>, Болоцков А.С.<sup>1</sup>, Фирсов М.С.<sup>1</sup>, Дадаян А.Р.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ЧУЗ «Клиническая больница «РЖД-Медицина» г. Ростов-на-Дону»; 344011 Ростов-на-Дону, ул. Варфоломеева, д. 92А, Российская Федерация

<sup>2</sup> ГБУ РО «ЦГБ им. Н.А. Семашко в г. Ростов-на-Дону»; 344003 Ростов-на-Дону, Ворошиловский пр., 105, Российская Федерация

**Цель исследования:** анализ литературных источников и сравнительная оценка результатов исследований об эффективности выполнения эластографии почек у практически здоровых пациентов, выработка нормативов жесткости для почек практически здоровых пациентов и разработка стандартной технологии выполнения исследования.

**Материал и методы.** Проведен поиск научных статей, публикаций, клинических рекомендаций, отчетов съездов и научных конгрессов в информационно-аналитических системах ELibrary, Google Scholar и PubMed за 2013–2024 гг. по ключевым словам: эластография почек, оценка жесткости почек, ультразвуковая эластография почек, renal elastography, renal stiffness, ultrasound elastography of the kidneys. Также проведен анализ списков литературы найденных статей по соответствующим критериям.

**Результаты.** По соответствующим ключевым словам было подобрано 288 статей, в том числе публикаций научных конгрессов и конференций, 39 из которых были признаны авторами соответствующими тематике научного обзора. Из списков литературы найденных статей было дополнительно выбрано 8 статей. В результате поиска была выделена группа статей, среди которых проанализирован материал для получения ответов на поставленные вопросы.

**Заключение.** Проведенный анализ данных литературы является одним из этапов систематизации ранее проведенных исследований в области эластичности почек и позволяет отметить важность исключения всех описанных предыдущими авторами факторов, вызывающих значительную вариабельность показателей жесткости неизменной паренхимы почки. В результате обзора авторы показали возможности использования двумерной ультразвуковой эластографии сдвиговой волной в оценке жесткости паренхимы почек неинвазивным методом и необходимость выработки стандартной методологии исследования, сводящую к минимуму погрешность.

**Ключевые слова:** эластография почек; оценка жесткости почек; ультразвуковая эластография почек

**Авторы подтверждают отсутствие конфликтов интересов.**

**Для цитирования:** Маджугин М.Л., Болоцков А.С., Фирсов М.С., Дадаян А.Р. Эластография паренхимы почек у здоровых пациентов (обзор литературы). *Медицинская визуализация*. 2025; 29 (1): 80–91.  
<https://doi.org/10.24835/1607-0763-1501>

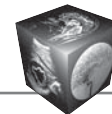
**Поступила в редакцию:** 06.10.2024. **Принята к печати:** 27.11.2024. **Опубликована online:** 17.01.2025.

## Elastography of renal parenchyma in healthy patients (literature review)

© Mikhail L. Madzhugin<sup>1\*</sup>, Alexander S. Bolotskov<sup>1</sup>,  
Maxim S. Firsov<sup>1</sup>, Arsen R. Dadayan<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Clinical Hospital "RZD-Medicine" in Rostov-on-Don; 92A, Varfolomeeva str., Rostov-on-Don 344011, Russian Federation

<sup>2</sup> Central City Hospital N.A. Semashko in Rostov-on-Don; 105, Voroshilovsky prosp., Rostov-on-Don 344003, Russian Federation



**Aim:** analysis of literature sources and comparative evaluation of research results on the effectiveness of performing renal elastography in almost healthy patients, development of stiffness standards for kidneys in practically healthy patients and development of a standard technology for performing the study.

**Material and methods.** A search was conducted for scientific articles, publications, clinical recommendations, reports of congresses in the information and analytical systems eLibrary, Google Scholar and PubMed for 2013–2024 by keywords: kidney elastography, assessment of kidney stiffness, ultrasound elastography of the kidneys, renal elastography, renal stiffness. The analysis of the literature lists of the found articles according to the relevant criteria was also carried out.

**Results.** According to the relevant keywords, 288 articles were selected, including publications of scientific congresses and conferences, 39 articles were recognized by the authors as corresponding to the subject of the scientific review. And 8 additional articles were selected from the literature lists of the found articles. As a result of the search, a group of articles was created among which the material was analyzed to get answers to the questions posed.

**Conclusion.** The analysis of the literature data is one of the stages of systematization of previously conducted studies in the field of renal elasticity and allows us to note the importance of excluding all factors described by previous authors that cause significant variability in the stiffness of unchanged renal parenchyma. As a result of the review, the authors showed the possibility of using 2D shear wave ultrasound elastography in assessing the stiffness of the renal parenchyma by a non-invasive method and the need to develop a standard research methodology that minimizes the error.

**Keywords:** renal elastography; renal stiffness; ultrasound elastography of the kidneys

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

**For citation:** Madzhugin M.L., Bolotskov A.S., Firsov M.S., Dadayan A.R. Elastography of renal parenchyma in healthy patients (literature review). *Medical Visualization*. 2025; 29 (1): 80–91. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1501>

**Received:** 06.10.2024.

**Accepted for publication:** 27.11.2024.

**Published online:** 17.01.2025.

## Введение

Длительное время ультразвуковое исследование (УЗИ) является наиболее востребованным методом для визуализации почек. УЗИ можно применять независимо от функции почек, это неинвазивный метод, который можно применять у беременных. Пункционная биопсия почки под ультразвуковым наведением является часто используемой процедурой и применяется в клинической практике как наиболее достоверный, но инвазивный метод диагностики. Отмечено, что заболеваемость различными болезнями почек неуклонно растет [1, 2], в связи с этим необходимо внедрение новых методик неинвазивной диагностики почек.

Метод эластографии сдвиговой волной позволяет получить информацию о жесткости различных тканей [3]. Эта методика уже давно доказала свою ценность в диагностике и оценке тяжести фиброзных изменений в печени. Следует отметить, что в отношении почек здоровых пациентов до недавнего времени не существовало достоверных данных о жесткости.

**Цель исследования:** анализ литературных источников и сравнительная оценка результатов исследований об эффективности выполнения эластографии почек у практически здоровых пациентов, выработка нормативов жесткости для почек практически здоровых пациентов и разработка стандартной технологии выполнения исследования.

## Материал и методы

Проведен поиск научных статей, публикаций, клинических рекомендаций, отчетов съездов и научных конгрессов в информационно-аналитических системах ELibrary, Google Scholar и PubMed за 2013–2024 гг. по ключевым словам: эластография почек, оценка жесткости почек, ультразвуковая эластография почек, renal elastography, renal stiffness, ultrasound elastography of the kidneys. Также проведен анализ списков литературы найденных статей по соответствующим критериям.

**Виды эластометрии и выбор варианта эластометрии для оценки жесткости почек.** При эластометрии используется ультразвук для количественной оценки жесткости ткани. Эта методика позволяет определить точную жесткость различных тканей, в отличие от пальпации, при которой невозможно определить жесткость в каких-либо единицах. Кроме того, эластография значительно превосходит обычное УЗИ, при котором нет возможности получить точную информацию об упругих свойствах ткани, поскольку распространение ультразвука в В-режиме практически равномерно в различных тканях [4].

Главным принципом эластографии является создание напряжения в ткани с последующим измерением деформации, вызванной этим напряжением [5]. Жесткость ткани возможно количественно оценить с помощью модуля Юнга, определяемого как соотношение между приложенным



напряжением и вызванной им деформацией и выражается в единицах давления – паскалях или чаще килопаскалях [6], в некоторых случаях, например при использовании методики ARFI (Acoustic Radiation Force Impulse), жесткость измеряют в скорости распространения ультразвука в м/с. В зависимости от вида внешней силы, которая была применена к ткани, можно выполнить различные виды эластографии.

**При статической или квазистатической эластографии** применяется компрессия тканей к интересующему органу и предоставляется в виде качественной карты с напряжением тканей до и после сжатия. Однако модуль Юнга этим методом не может быть рассчитан, поскольку величина приложенной компрессии неизвестна; изображение такой деформации, обычно называемое эластограммой, отображается в виде цветной карты и затем сравнивается со здоровыми тканями [7, 8].

**Транзиентная эластография** показывает одномерное количественное изображение жесткости исследуемой ткани. Главный принцип заключается в создании временной вибрации кожи с помощью специального устройства, встроенного в датчик, а затем в регистрации при помощи одномерного датчика поперечных волн, которые распространяются внутри исследуемой ткани. Таким образом возможно получение количественной линии жесткости тканей. Также эта методика используется в 2D с получением карты модуля Юнга в исследуемой ткани [6].

**Acoustic Radiation Force Impulse (ARFI)** – это технология создания сдвиговых волн, использующая радиационное давление (силу) сфокусированного ультразвукового импульса, позволяющая построить качественную карту жесткости исследуемой ткани. ARFI использует сфокусированный луч ультразвука для воздействия локализованной силы излучения на малые объемы исследуемой ткани на короткие временные промежутки [9]; эта сила вызывает переменное смещение ткани, варьирующее в зависимости от жесткости ткани в фокальном пятне [6, 9]. Произведя измерения в разных местах, можно получить двухмерную карту жесткости [9].

**Shear Wave Elasticity Imaging (SWEI), или эластография сдвиговой волной.** В методике SWE внутри тканей генерируется источник попе-

речных сверхзвуковых волн, при этом амплитуда поперечных волн увеличивается при одновременном ограничении акустической мощности. Множественные импульсы лучевого пучка могут последовательно сфокусированы в разных точках тестируемой ткани и вызывают поперечную волну. Импульсы посылаются от датчика на разную глубину со скоростью выше скорости генерируемых поперечных волн; в итоге все поперечные волны концентрируются на малой площади, имеющей форму “конуса Маха”, что увеличивает их амплитуду и дальность распространения. Генерируемые поперечные волны затем количественно картируются с использованием метода сверхбыстрой визуализации [10].

Методика компрессионной эластографии нашла широкое применение при патологии поверхностно расположенных органов [11], таких как щитовидная железа и молочная железа, однако эти методики бесполезны при исследовании глубоко расположенных органов, таких как почка [12], кроме того, разнородность тканей отдельных тканей даже в здоровой почке не позволяет сравнить результаты в разных ее отделах [13].

При транзиентной эластографии объем образца длиной не более 4 см помещается в окно с небольшими отклонениями ниже поверхности кожи (20–60 мм), при этой методике нет ультразвукового контроля для позиционирования образца в почке, которая расположена на различной глубине [13]. Поэтому при исследовании почки могут возникнуть ошибки в интерпретации результатов.

Методики на основе анализа сдвиговой волны и ARFI максимально подходят для оценки жесткости почек, поскольку они позволяют по отдельности оценить различные отделы почки.

### Результаты исследования

В результате исследования 288 статей по соответствующим ключевым словам были выбраны 47 работ полностью или частично соответствующих основной цели статьи. По результатам анализа выяснено, что был проведен ряд исследований на животных и людях с различными результатами (см. таблицу) [13–31]. Однако выявлено, что по результатам исследований возникают многочисленные неопределенности из-за сложности методологии, архитектуры почки или гетерогенных и динамических процессов.



**Таблица.** Сравнительный анализ исследований жесткости почки различными методами эластографии  
**Table.** Comparative analysis of kidney stiffness studies using various elastography methods

| Источник<br>Количество<br>исследований<br>пациентов<br>или животных<br>Number of patient<br>or animal studies | Тип исследования<br>Type of research                  | Метод<br>Method | Среднее значение модуля Юнга (кПа) или ССВ (м/с)<br>The average value of Yung's modulus (kPa) or SSW(m/s)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Выводы, имеющие статистическую значимость<br>Conclusions of statistical significance                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Arda K. et al., 2011 [14]<br>n = 127                                                                          | Здоровые почки<br>Healthy kidneys                     | SWEI            | Кора:<br>5,2 ± 2,9 кПа мужчины,<br>4,9 ± 2,9 кПа женщины<br>Почечная лоханка:<br>24,7 ± 4,9 кПа мужчины,<br>23,1 ± 5,5 кПа женщины<br>Cortex:<br>5,2 ± 2,9 kPa men,<br>4,9 ± 2,9 kPa women<br>Renal pelvis:<br>24,7 ± 4,9 kPa men,<br>23,1 ± 5,5 kPa women                                                                                                                                                                                     | Кора имеет значительно меньшую жесткость в отношении лоханки<br>Отсутствуют данные о жесткости мозгового вещества<br>The cortex has significantly less stiffness in relation to the pelvis.<br>There is no data on the stiffness of the medulla                                                                                                                                                      |
| Genisson J.L. et al., 2012 [15]<br>n = 3                                                                      | Здоровые почки<br>свины<br>Healthy kidneys<br>of pigs | SWEI            | Внутренняя кора: 8,1 ± 1,9 кПа<br>Внешняя кора: 6,9 ± 1,4 кПа<br>Inner crust: 8,1 ± 1,9 kPa<br>Outer crust: 6,9 ± 1,4 kPa                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Эластичность варьирует в зависимости от анизотропии и от васкуляризации и давления мочи<br>Внутренняя кора имеет более высокую эластичность, чем внешняя кора, обусловлено различиями в перфузии<br>Stiffness varies depending on the anisotropy of vascularization and urine pressure<br>The inner cortex has a higher stiffness than the outer cortex, which is due to differences in blood supply |
| Grenier H. et al., 2013 [13]                                                                                  | Здоровые почки<br>Healthy kidneys                     | SWEI            | Медулярная жесткость: 10,8 ± 2,7 кПа<br>Кортикальная жесткость: 15,4 ± 2,5 кПа<br>Medullary stiffness: 10,8 ± 2,7 kPa<br>Cortical stiffness: 15,4 ± 2,5 kPa                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Эластичность коры выше, чем мозговой слой<br>The values of cortical stiffness were higher than those of the medullar part                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Guo L.H. et al., 2013 [16]<br>327 здоровых, 64 ХБП<br>327 healthy, 64 chronic<br>kidney disease (CKD)         | Здоровые vs ХБП<br>Healthy vs CKD                     | ARFI            | Здоровый контроль: 2,15 ± 0,51 м/с<br>ХБП 1–5-й стадии:<br>1,81 ± 0,43 м/с, 1,79 ± 0,29 м/с,<br>1,81 ± 0,44 м/с, 1,64 ± 0,55 м/с,<br>1,36 ± 0,17 м/с соответственно<br>Пороговое значение для прогнозирования ХБП 1,88 м/с<br>Healthy control: 2,15 ± 0,51 m/s<br>CKD 1–5 stages:<br>1,81 ± 0,43 m/s, 1,79 ± 0,29 m/s,<br>1,81 ± 0,44 m/s, 1,64 ± 0,55 m/s,<br>1,36 ± 0,17 m/s respectively<br>The threshold value for predicting CKD 1.88 m/s | При сравнении стадий ХБП ССВ увеличивается у здоровых<br>ARFI прогнозирует только ХБП 5-й стадии<br>SSW связан только с СКФ, азотом мочевины и креатинином<br>When compared with each stage of CKD, SSW increases in healthy people<br>ARFI predicts only stage 5 of CKD<br>SSW is associated only with GFR, urea nitrogen and creatinine                                                            |



Таблица (продолжение).  
Table (continuation).

| Источник<br>Количество<br>исследований<br>пациентов<br>или животных<br>Number of patient<br>or animal studies | Тип исследования<br>Type of research                                   | Метод<br>Method | Среднее значение модуля Юнга (кПа) или ССВ (м/с)<br>The average value of Yung's modulus (kPa) or SSW(m/s)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Выводы, имеющие статистическую значимость<br>Conclusions of statistical significance                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Bruno C. et al (2013) [17]<br>28 ПМП, 16 здоровых<br>28 vesicoureteral reflux<br>(VUR), 16 healthy            | Здоровые vs<br>пузырно-<br>мочеточниковый<br>рефлюкс<br>Healthy vs VUR | ARFI            | ССВ в "пораженных" почках: $5.70 \pm 1.71$ м/с;<br>в контралатеральных: $4.09 \pm 0.97$ м/с;<br>в здоровых почках: $3.13 \pm 0.09$ м/с;<br>ССВ при вторичном ПМП: $6.59 \pm 1.45$ м/с;<br>при первичном ПМП: $5.35 \pm 1.72$ м/с<br>SSW in the "affected" kidneys: $5.70 \pm 1.71$ m/s;<br>in the contralateral: $4.09 \pm 0.97$ m/s;<br>in healthy: $3.13 \pm 0.09$ m/s;<br>SSW at secondary VUR: $6.59 \pm 1.45$ m/s;<br>at primary VUR: $5.35 \pm 1.72$ m/s | ССВ в "пораженных" почках выше, чем ССВ<br>в "контралатеральных" почках, и у "здоровых"<br>Существенная разница ССВ в "контралатеральных"<br>и "здоровых" почках<br>Более высокая ССВ при вторичном ПМП по сравнению<br>с первичным ПМП<br>SSW in "affected" kidneys is higher than SSW in both "contralateral"<br>kidneys and in "healthy"<br>A significant difference between SSW in "contralateral" and "healthy"<br>kidneys<br>Higher SSW in secondary VUR compared to primary VUR |
| Cui G. et al., 2014 [18]<br>n = 76                                                                            | Здоровые vs ХБП<br>Healthy (biopsy) vs<br>CKD                          | ARFI            | Без фиброза: $1.59 \pm 0.14$ м/с<br>Легкий фиброз: $2.15 \pm 0.38$ м/с<br>Средний фиброз: $2.29 \pm 0.53$ м/с<br>Тяжелый фиброз: $2.24$ м/с<br>Пороговое значение фиброза: $1.67$ м/с<br>No fibrosis: $1.59 \pm 0.14$ m/s<br>Mild fibrosis: $2.15 \pm 0.38$ m/s<br>Average fibrosis: $2.29 \pm 0.53$ m/s<br>Heavy fibrosis: $2.24$ m/s<br>Fibrosis threshold value: $1.67$ m/s                                                                                 | ССВ значительно выше в легкой форме и группы умеренного<br>фиброза при сравнении с группой без фиброза<br>Нет существенной разницы между легкой и среднетяжелой<br>группами<br>SSW values were significantly increased in the mild and average<br>fibrosis groups when compared with the "no fibrosis" group<br>No significant difference between the mild and average groups                                                                                                          |
| Sohn B. et al., 2014 [19]<br>19 здоровых,<br>30 гидронефроз<br>19 healthy,<br>30 hydronephrosis               | Здоровые vs<br>гидронефроз<br>Healthy vs hydronephrosis                | ARFI            | Высокая степень гидронефроза: $2.02$ м/с<br>Здоровые пациенты: $1.75$ м/с<br>High grade of hydronephrosis: $2.02$ m/s<br>Healthy patients: $1.75$ m/s                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Среднее ССВ в почках с гидронефрозом высокой степени выше,<br>чем ССВ в контралатеральной почке, но ниже, чем у здоровых<br>The mean SSW in kidneys with high-grade hydronephrosis was higher<br>than the rate in the contralateral kidney, but lower than in healthy                                                                                                                                                                                                                  |
| Bob F. et al., 2014 [20]<br>68 здоровых,<br>20 с патологией<br>68 healthy,<br>20 renal pathology              | Здоровые vs<br>почечная патология<br>Healthy vs renal<br>pathology     | ARFI            | Нормальные почки:<br>$2.42 \pm 0.70$ м/с (оператор 1),<br>$2.54 \pm 0.83$ м/с (оператор 2)<br>С заболеванием почек:<br>$2.11 \pm 0.79$ м/с (оператор 1),<br>$2.14 \pm 0.84$ м/с (оператор 2)<br>Healthy:<br>$2.42 \pm 0.70$ m/s (operator 1),<br>$2.54 \pm 0.83$ m/s (operator 2),<br>Renal pathology:<br>$2.11 \pm 0.79$ m/s (operator 1),<br>$2.14 \pm 0.84$ m/s (operator 2)                                                                                | Средние показатели ССВ почек были выше, но статистически<br>незначимы у пациентов без патологии почек по сравнению<br>с заболеваниями почек<br>The average values of renal SSW were higher, but not statistically<br>significant, in patients without renal pathology compared with<br>patients with kidney disease                                                                                                                                                                    |

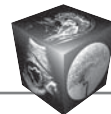


Таблица (продолжение).  
Table (continuation).

| Источник<br>Количество<br>исследований<br>пациентов<br>или животных<br>Number of patient<br>or animal studies | Тип исследования<br>Type of research   | Метод<br>Method | Среднее значение модуля Юнга (кПа) или ССВ (м/с)<br>The average value of Yung's modulus (kPa) or SSW(m/s)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Выводы, имеющие статистическую значимость<br>Conclusions of statistical significance                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Asano K. et al., 2014 [21]<br>14 здоровых, 319 ХБП<br>14 Healthy, 319 CKD                                     | Здоровые vs ХБП<br>Healthy vs CKD      | ARFI            | ССВ у здоровых: 2,20 м/с в коре, 2,75 м/с в мозговом веществе<br>SSW in healthy: 2.20 m/s in the cortex, 2.75 m/s in the medulla                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | ССВ в большей степени зависит от снижения кровотока, чем от фиброза<br>Значительная положительная корреляция между ССВ и СКФ<br>SSW depends more on a decrease in blood flow than on the progression of fibrosis<br>A significant positive correlation between SSW and GFR                                                                                                                                                                                              |
| Hu Q. et al., 2014 [22]<br>32 здоровых, 163 ХБП<br>32 healthy, 163 CKD                                        | Здоровые vs ХБП<br>Healthy vs CKD      | ARFI            | Предельные значения:<br>при легких нарушениях функции почек 2,65 м/с<br>средняя степень: 2,50 м/с<br>тяжелая степень: 2,33 м/с<br>Limit values:<br>with mild renal impairment 2.65 m/s<br>medium grade: 2.50 m/s<br>severe grade: 2.33 m/s                                                                                                                                                                                                                                   | Средняя ССВ с тяжелым нарушением была ниже, чем при легком нарушении, и умеренно значима у группы с нарушениями и контрольной группы<br>У пациентов с ХБП ССВ значимо коррелировала с СКФ и креатинином<br>The average SSW in the kidneys with severe impairment was significantly lower than with mild impairment, and moderately significant in the impaired group and the control group<br>In CKD patients, SSW was significantly correlated with GFR and creatinine |
| Yu N. et al., 2014 [23]<br>120 СД 2 типа,<br>30 здоровых<br>120 type 2 diabetes,<br>30 healthy                | Здоровые vs СД<br>Healthy vs diabetes  | ARFI            | Контроль: $2,22 \pm 0,47$ м/с<br>Нормоальбуминурия: $2,29 \pm 0,20$ м/с<br>Микроальбуминурия: $2,53 \pm 0,16$ м/с<br>Макроальбуминурия: $2,98 \pm 0,32$ м/с<br>Пороговое значение для прогнозирования диабетической нефропатии 2,43 м/с<br>Control: $2.22 \pm 0.47$ m/s<br>Normalalbuminuria: $2.29 \pm 0.20$ m/s<br>Microalbuminuria: $2.53 \pm 0.16$ m/s<br>Macroalbuminuria: $2.98 \pm 0.32$ m/s<br>The threshold value for predicting diabetic nephropathy is = 2.43 m/s | Нет достоверной разницы между нормоальбуминурией и контрольной группой<br>Значительная разница между микроальбуминурией и контрольной группой<br>Значительная разница между парой СД и контроль<br>No significant difference between normalalbuminuria and the control group<br>Significant difference between microalbuminuria and the control group<br>Significant difference between a pair of diabetes and control                                                  |
| Tian F. et al., 2014 [24]<br>259 подагра,<br>200 здоровые<br>259 gout, 200 healthy                            | Здоровые vs подагра<br>Healthy vs gout | ARFI            | Паренхима (контрольная группа) $2,73 \pm 0,82$ м/с<br>Синус (контрольная группа) $3,02 \pm 0,45$ м/с<br>Паренхима (подагра) $2,73 \pm 0,82$ м/с<br>Синус (подагра) $3,02 \pm 0,45$ м/с<br>Renal parenchyma (control group) $2.73 \pm 0.82$ m/s<br>Renal sinus (control group) $3.02 \pm 0.45$ m/s<br>Renal parenchyma (gout) $2.73 \pm 0.82$ m/s<br>Renal sinus (gout) $3.02 \pm 0.45$ m/s                                                                                   | Паренхиматозная и синусная ССВ значительно выше в подагрической почке, чем контроль<br>$\beta_2$ -Микроглобулин мочи положительно коррелирует с ССВ почечной паренхимы при подагрической почке<br>Parenchymal and sinus SSW are significantly higher in the gout than in the control<br>$\beta_2$ -Urinary microglobulin positively correlates with SSW of the renal parenchyma in gouty                                                                                |



Таблица (продолжение).  
Table (continuation).

| Источник<br>Количество<br>исследований<br>пациентов<br>или животных<br>Number of patient<br>or animal studies             | Тип исследования<br>Type of research                                             | Метод<br>Method | Среднее значение модуля Юнга (кПа) или CCB (м/с)<br>The average value of Yung's modulus (kPa) or SSW (m/s)                                                                                                                                                                                                              | Выводы, имеющие статистическую значимость<br>Conclusions of statistical significance                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Samir A. E et al (2015) [25]<br>20 здоровые, 25 ХБП<br>20 healthy, 25 CKD                                                 | Здоровые vs ХБП<br>Healthy vs CKD                                                | SWEI            | Здоровые контроль: 4,40 кПа (3,68, 5,70)<br>ХБП: 9,40 кПа (5,55–22,35)<br>Пороговое значение для прогнозирования ХБП 5,3 кПа<br>Healthy controls: 4,40 кПа (3,68, 5,70)<br>CKD: 9,40 кПа (5,55–22,35)<br>Threshold value for predicting CKD 5,3 kPa                                                                     | ХБП связана с увеличением медианы модуля Юнга и более высокое медианное межпредметное измерение изменчивости модуля Юнга<br>CKD was associated with an increase in the median Young's modul and a higher median intersubject measurement of the variability of Young's Modul was estimated                                                                                                                                                          |
| Göya S. et al., 2015 [26]<br>281 здоровые,<br>114 диабетическая<br>нефропатия<br>281 healthy, 114 diabetic<br>nephropathy | Здоровые vs<br>диабетическая<br>нефропатия<br>Healthy vs diabetic<br>nephropathy | ARFI            | Нефропатия стадии 1–5:<br>2,87; 3,14; 2,95; 2,68; 2,55 м/с<br>Пороговое значение для прогнозирования нефропатии<br>2,43 м/с<br>здоровые контроль: 2,35 м/с<br>Stages of nephropathy 1–5:<br>2,87; 3,14; 2,95; 2,68; 2,55 м/с<br>Threshold value for the prediction of nephropathy 2,43 m/s<br>healthy control: 2,35 m/s | ARFI смогла различить разные стадии нефропатии, кроме 5-й стадии<br>У здоровых была статистически значимая корреляция между CCB возрастом и полом<br>ARFI was able to distinguish between different stages of nephropathy, except for stage 5<br>Healthy volunteers showed a statistically significant correlation between age and gender                                                                                                           |
| Bota S. et al., 2015 [28]<br>91 здоровых<br>91 healthy                                                                    | Здоровые<br>Healthy                                                              | ARFI            | Левая почка – 2,36 ± 0,75 м/с<br>Правая почка – 2,49 ± 0,81 м/с<br>The left kidney is – 2,36 ± 0,75 m/s<br>The right kidney is – 2,49 ± 0,81 m/s                                                                                                                                                                        | CCB в основном зависит от возраста и пола и в меньшей степени от глубины измерения<br>SSW is mainly influenced by age and gender, and to a lesser extent by the depth of measurement                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Göya S. et al., 2015 [26]<br>88 с ПМР, 20 здоровы<br>88 VUR, 20 Healthy                                                   | Здоровые vs<br>пузырно-<br>мочеточниковый<br>рефлюкс<br>Healthy vs VUR           | ARFI            | Здоровые 2,39 ± 0,22 м/с<br>Пузырно-мочеточниковый рефлюкс 1,83 ± 0,44 м/с<br>In healthy controls 2,39 ± 0,22 m/s<br>The mean SSW of damaged kidneys 1,83 ± 0,44 m/s                                                                                                                                                    | Более высокая CCB в неповрежденных почках<br>CCB снижается с повышением степени ПМР, увеличение повреждения почек по данным нефросцинтиграфии и снижение выделительной функции по данным нефросцинтиграфии<br>Significantly higher SSW in intact kidneys<br>SSW decreases with an increase in the degree of VUR, an increase in kidney damage assessed by nephrosцинтиgraphy and a decrease in differential function assessed by nephrosцинтиgraphy |
| Амосов А. В. и др., 2015<br>[29]<br>40 с почечными<br>образованиями<br>40 with kidney formations                          | Здоровые vs<br>почечные<br>образования<br>Healthy vs kidney<br>formations        | SWEI            | Жесткость нормальной паренхимы во всех группах<br>5–17 кПа<br>The stiffness of the normal parenchyma in all groups<br>is 5–17 kPa                                                                                                                                                                                       | Отсутствует сравнение медианы модуля Юнга слоев почки<br>There is no comparison of the median Young's modulus of layers of the kidney                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |



Таблица (окончание).  
Table (end).

| Источник<br>Количество<br>исследований<br>пациентов<br>или животных<br>Number of patient<br>or animal studies | Тип исследования<br>Type of research                                                                   | Метод<br>Method | Среднее значение модуля Юнга (кПа) или ССВ (м/с)<br>The average value of Yung's modulus (kPa) or SSW(m/s)                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Выводы, имеющие статистическую значимость<br>Conclusions of statistical significance                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Борсуков А.В. и др., 2016<br>[30]<br>79 детей<br>79 children                                                  | Метаболический<br>синдром vs<br>ожирение vs<br>здоровые<br>Metabolic Syndrome<br>vs obesity vs healthy | SWEI            | Дети с метаболическим синдромом:<br>правая почка 32,81 кПа, левая почка 29,42 кПа<br>Дети с ожирением:<br>правая 14,32 кПа, левая 15,20 кПа.<br>Здоровые дети:<br>правая 7,80 кПа, левая 7,48 кПа<br>Children with metabolic syndrome:<br>a right kidney 32.81 kPa; a left kidney – 29.42 kPa<br>Obese children:<br>right – 14.32 kPa, left – 15.20 kPa.<br>Healthy children:<br>right – 7.80 kPa, left – 7.48 kPa | Более высокое значение медианы модуля Юнга при<br>метаболическом синдроме<br>Ожирение: медиана модуля Юнга ниже, чем при ожирении, но<br>выше, чем у здоровых<br>Significantly higher value of the median Young's modulus in patients<br>with metabolic syndrome<br>Obesity: the median Young's modulus is lower than in obese, but<br>higher than in healthy  |
| Бекезин В.В. и др., 2022<br>[31]<br>40 детей<br>40 children                                                   | Артериальная<br>гипертензия (АГ) vs<br>здоровые<br>Arterial hypertension<br>(AH) vs healthy            | SWEI            | Со стабильной АГ жесткость (правая/левая)<br>33,46/33,36 кПа<br>С лабильной АГ 20,24/21,14 кПа<br>Здоровые 7,37/7,80 кПа<br>With stable AH stiffness (right/left) 33.46/33.36 kPa<br>With labile AH of 20.24/21.14 kPa<br>Healthy 7.37/7.80 kPa                                                                                                                                                                    | Более высокая медиана модуля Юнга при стабильной АГ<br>Лабильная АГ: медиана модуля Юнга ниже, чем при стабильной<br>АГ, но выше, чем у здоровых<br>Significantly higher median Young's modulus in patients with stable<br>hypertension<br>Labile hypertension: the median Young's modulus is lower than in<br>stable hypertension, but higher than in healthy |

Примечание. ПМР – пузырно-мочеточниковый рефлюкс, СКФ – скорость клубочковой фильтрации, ССВ – скорость сдвиговой волной.

Note. VUR – vesicoureteral reflux, GFR – Glomerular filtration rate, SSW – the speed of the shear wave.



Самой актуальной проблемой является отсутствие нормативов пределов жесткости в почке относительно здоровых пациентов, как это было определено для печени [32–34], щитовидной железы [35] и молочной железы [36]. Параметры, приведенные в статьях, значительно различаются, что свидетельствует о необходимости дальнейшего изучения способов и методики эластографии здоровых почек. Так, из таблицы видно, что значения жесткости коры почки варьируют по разным оценкам от  $15,4 \pm 2,5$  кПа [13] до  $5,0 \pm 2,9$  кПа [14] или даже  $4,40$  ( $3,68$ – $5,70$ ) кПа [24] для модуля Юнга в SSI или SWEI и от  $1,75$  м/с [18] до  $2,54 \pm 0,83$  м/с [21] для скорости поперечной волны при выполнении эластографии по методике ARFI. Углубленное исследование жесткости неизменной паренхимы почек имеет важное значение, так как сообщалось о существенных различиях жесткости между внешней и внутренней корой [15], между медуллярной и кортикальной частью почек [13], а также между корой и лоханкой почки [14], причем на вариабельность результатов могут влиять несколько факторов. В ARFI это мощность силы, приложенной к датчику [13, 37, 38], глубина расположения зоны интереса (ROI) [20, 27, 38]. В большинстве современных аппаратов максимальная глубина составляет 8 см, а также важна частота датчика [7, 38, 39], все это является потенциальными модификаторами скорости поперечной волны. Кроме того, в поздних стадиях хронической болезни почек (ХБП) размещение ROI на коре может быть проблематично ввиду истончения паренхимы.

Еще один феномен – анизотропия, который присутствует во всех отделах почки, особенно в мозговом слое [15, 40–42], что важно учитывать при интерпретации результатов; так, направление луча ультразвука по перпендикулярной оси на эти структуры приведет к повышению значения жесткости, поскольку поперечные волны распространяются быстрее; если луч ультразвука направлен параллельно к высокоанизотропной структуре, значения жесткости будут ниже, поскольку поперечные волны распространяются медленнее и рассеиваются в результате множественных отражений, создаваемых почечными канальцами, стромой и кровеносными сосудами [13, 15]. Следовательно, измерение жесткости в одной и той же части почки (субкапсулярной, корковой и мозгового вещества) целесообразно для получения достоверных и единообразных результатов [20, 27], а также для установления универсальных стандартов методологии выполнения исследования и для получения стабильных и сопоставимых результатов в будущем.

Кровоснабжение также влияет на измеренные значения жесткости почки. В одном исследовании, проведенном на животных J.L. Genisson и соавт., сообщалось о снижении жесткости почек после перевязки почечной артерии и, наоборот, повышении жесткости после перевязки почечной вены [15]. Кроме того, К. Asano и соавт. предположили, что при ХБП повышенная жесткость почки, измеренная при помощи ARFI, может быть вызвана сосудистыми аномалиями при ХБП, чем фиброзом паренхимы почки [21].

Перед выполнением эластографии необходимо исключить обструкцию верхних мочевых путей, поскольку в нескольких исследованиях сообщалось о линейном увеличении жесткости ткани почек, связанном с повышением давления мочи, обусловленном обструкцией верхних мочевых путей [15, 19].

Раса, пол и индекс массы тела (ИМТ), а также возраст [30, 31, 42] могут быть потенциальными модификаторами результатов ультразвуковой эластографии, и многие из перечисленных в таблице исследований выявили значительные различия жесткости почечной паренхимы по этим параметрам.

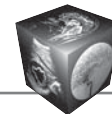
Обследования необходимо проводить на задержке дыхания, что может быть затруднено, особенно у детей [19, 30, 31].

Различные авторы сообщали о согласии между наблюдателями при разных коэффициентах внутриклассовой корреляции (ИКК) от  $0,71$  [20] до  $0,47$  [43] или даже  $0,31$  [44], что меньше, чем при оценке печеночного фиброза [44–46]. Такие различия объясняются более глубоким расположением почки по сравнению с печенью, разным опытом операторов в области ультразвуковой эластографии почек или могут быть обусловлены типом исследуемой почки: нативной или трансплантированной. Коэффициенты вариации внутри наблюдателя также составляют от  $20\%$  [47] до  $24\%$  [44].

Следует отметить, что отдельные авторы за последние годы пришли к выводу о возможности применения эластографии в диагностике неизменной паренхимы почек и разработали таблицу для стандартной технологии выполнения SWE, сводящую к минимуму погрешность, по аналогии со стандартами технологии эластографии печени, принятой во Всемирной федерации ультразвука в медицине и биологии (WFUMB) [48].

### Заключение

Проведенный анализ данных литературы является этапом систематизации ранее проведенных исследований в области эластографии почек и позволяет отметить важность исключения всех опи-



санных предыдущими авторами факторов, вызывающих значительную вариабельность показателей жесткости неизменной паренхимы почки. В результате обзора авторы показали возможности использования двухмерной ультразвуковой эластографии сдвиговой волной в оценке жесткости паренхимы почек неинвазивным методом и необходимости выработки стандартной методологии исследования, сводящей к минимуму погрешность.

#### Участие авторов

Маджугин М.Л. – проведение исследования, сбор и обработка данных, анализ и интерпретация полученных данных, участие в научном дизайне, подготовка, создание опубликованной работы, написание текста, статистическая обработка данных, ответственность за целостность всех частей статьи.

Болоцков А.С. – концепция и дизайн исследования, сбор и обработка данных, утверждение окончательного варианта статьи, подготовка, создание опубликованной работы, утверждение окончательной редакции статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

Фирсов М.С. – статистическая обработка данных.

Дадаян А.Р. – обзор публикаций по теме статьи, участие в научном дизайне.

#### Authors' participation

Madzhugin M.L. – conducting research, collection and analysis of data, analysis and interpretation of the obtained data, participation in scientific design, preparation and creation of the published work, writing text, statistical analysis, responsibility for the integrity of all parts of the article.

Bolotskov A.S. – concept and design of the study, collection and analysis of data, approval of the final version of the article, preparation and creation of the published work, approval of the final version of the article, responsibility for the integrity of all parts of the article.

Firsov M.S. – statistical analysis.

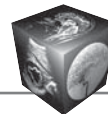
Dadayan A.R. – review of publications, participation in scientific design.

#### Список литературы [References]

- Nie P., Chen R., Luo M. et al. Clinical and Pathological Analysis of 4910 Patients Who Received Renal Biopsies at a Single Center in Northeast China. *Biomed. Res. Int.* 2019; 1: 6869179. <http://doi.org/10.1155/2019/6869179>
- Zhang Q.L., Rothenbacher D. Prevalence of chronic kidney disease in population-based studies: systemic review. *BMC Public Health.* 2008; 8: 117. <http://doi.org/10.1186/1471-2458-8-117>
- Ophir J., Céspedes I., Ponnekanti H. et al. Elastography: a quantitative method for imaging the elasticity of biological tissues. *Ultrason. Imaging.* 1991; 13 (1): 111–134. <http://doi.org/10.1177/016173469101300201>
- Wang L. Acoustic Radiation Force Based Ultrasound Elasticity Imaging for Biomedical Applications. *Sensors (Basel).* 2018; 18 (7): 2252. <http://doi.org/10.3390/s18072252>
- Sigrist R.M.S., Liao J., Kaffas A.E. et al. Ultrasound Elastography: Review of Techniques and Clinical Applications. *Theranostics.* 2017; 7 (5): 1303–1329. <http://doi.org/10.7150/thno.18650>
- Ozturk A., Grajo J.R., Dhyani M. et al. Principles of ultrasound elastography. *Abdom. Radiol. (NY).* 2018; 43 (4): 773–785. <http://doi.org/10.1007/s00261-018-1475-6>
- Dietrich C.F., Bamber J., Berzigotti A. et al. EFSUMB Guidelines and Recommendations on the Clinical Use of Liver Ultrasound Elastography, Update 2017 (Long Version). *Ultraschall. Med.* 2017; 38 (4): e16–e47. <http://doi.org/10.1055/s-0043-103952>
- European Association for Study of Liver. EASL Clinical Practice Guidelines: management of hepatitis C virus infection. *J. Hepatol.* 2014; 60 (1): 392–420. <http://doi.org/10.1016/j.jhep.2013.11.003>
- Mathew G.G., Gunda K.C., Prakash K.C. et al. Correlation of Acoustic Radiation Force Impulse Imaging with Chronicity Markers in Native Renal Biopsy. *G. Ital. Nefrol.* 2023; 40 (4): 4.
- Demin I.Y., Rykhtik P.I., Spivak A.E., Safonov D.V. A New Criterion for Shear Wave Elastometric Assessment Using Modulus of Stiffness Difference between Object and Environment. *Sovrem. Tekhnologii Med.* 2022; 14 (5): 5–13. <http://doi.org/10.17691/stm2022.14.5.01>
- Cosgrove D., Barr R., Bojunga J. et al. WFUMB Guidelines and Recommendations on the Clinical Use of Ultrasound Elastography: Part 4. Thyroid. *Ultrasound Med. Biol.* 2017; 43 (1): 4–26. <http://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2016.06.022>
- Barr R.G., Wilson S.R., Rubens D. et al. Update to the Society of Radiologists in Ultrasound Liver Elastography Consensus Statement. *Radiology.* 2020; 296 (2): 263–274. <http://doi.org/10.1148/radiol.2020192437>
- Grenier N., Gennisson J.L., Cornelis F. et al. Renal ultrasound elastography. *Diagn. Interv. Imaging.* 2013; 94: 545–550. <http://doi.org/10.1016/j.diii.2013.02.003>
- Arda K., Ciledag N., Aktas E. et al. Quantitative assessment of normal soft-tissue elasticity using shear-wave ultrasound elastography. *Am. J. Roentgenol.* 2011; 197 (1): 532–536. <http://doi.org/10.2214/AJR.10.5449>
- Gennisson J.L., Grenier N., Combe C., Tanter M. Supersonic shear wave elastography of in vivo pig kidney: influence of blood pressure, urinary pressure and tissue anisotropy. *Ultrasound Med. Biol.* 2012; 38 (1): 1559–1567. <http://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2012.04.013>
- Guo L.H., Xu H.X., Fu H.J. et al. Acoustic radiation force impulse imaging for noninvasive evaluation of renal parenchyma elasticity: preliminary findings. *PLoS One.* 2013; 8 (1): e68925. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0068925>
- Bruno C., Caliri G., Zaffanello M. et al. Acoustic radiation force impulse (ARFI) in the evaluation of the renal parenchymal stiffness in pediatric patients with vesicoureteral reflux: preliminary results. *Eur. Radiol.* 2013; 23 (1): 3477–3484. <http://doi.org/10.1007/s00330-013-2959-y>
- Cui G., Yang Z., Zhang W. et al. Evaluation of acoustic radiation force impulse imaging for the clinicopathological typing of renal fibrosis. *Exp. Ther. Med.* 2014; 7 (1): 233–235. <http://doi.org/10.3892/etm.2013.1377>



19. Sohn B., Kim M.J., Han S.W. et al. Shear wave velocity measurements using acoustic radiation force im-pulse in young children with normal kidneys versus hydro-nephrotic kidneys. *Ultrasonography*. 2014; 33 (1): 116–121. <http://doi.org/10.14366/usg.14002>
20. Bob F., Bota S., Sporea I. et al. Kidney shear wave speed values in subjects with and without renal pathology and interoperator reproducibility of acoustic radiation force impulse elastography (ARFI) – preliminary results. *PLoS One*. 2014; 9 (1): e113761. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0113761>
21. Asano K., Ogata A., Tanaka K. et al. Acoustic radiation force impulse elastography of the kidneys: is shear wave velocity affected by tissue fibrosis or renal blood flow? *J. Ultrasound Med*. 2014; 33 (1): 793–801. <http://doi.org/10.7863/ultra.33.5.793>
22. Hu Q., Wang X.Y., He H.G. et al. Acoustic radiation force impulse imaging for noninvasive assessment of renal histopathology in chronic kidney disease. *PLoS One*. 2014; 9 (1): e115051. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0115051>
23. Yu N., Zhang Y., Xu Y. Value of virtual touch tissue quantification in stages of diabetic kidney disease. *J. Ultrasound Med*. 2014; 33 (1): 787–792. <http://doi.org/10.7863/ultra.33.5.787>
24. Tian F., Wang Z.B., Meng D.M. et al. Preliminary study on the role of virtual touch tissue quantification combined with a urinary  $\beta$ 2-microglobulin test on the early diagnosis of gouty kidney damage. *Ultrasound Med. Biol*. 2014; 40 (1): 1394–1399. <http://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2014.01.01>
25. Samir A.E., Allegretti A.S., Zhu Q. et al. Shear wave elastography in chronic kidney disease: a pilot experience in native kidneys. *BMC Nephrol*. 2015; 16 (1): 119. <http://doi.org/10.1186/s12882-015-0120-7>
26. Goya C., Kilinc F., Hamidi C. et al. Acoustic radiation force impulse imaging for evaluation of renal parenchyma elasticity in diabetic nephropathy. *Am. J. Roentgenol*. 2015; 204 (1): 324–329. <http://doi.org/10.2214/AJR.14.12493>
27. Sommerer C., Scharf M., Seitz C. et al. Assessment of renal allograft fibrosis by transient elastography. *Transpl. Int*. 2013; 26 (1): 545–551. <http://doi.org/10.1111/tri.12073>
28. Bota S., Bob F., Sporea I. et al. Factors that influence kidney shear wave speed assessed by acoustic radiation force impulse elastography in patients without kidney pathology. *Ultrasound Med. Biol*. 2015; 41 (1): 1–6. <http://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2014.07.023>
29. Амосов А.В., Крупинов Г.Е., Сорокин Н.И., Кубаней-швили И.С., Семендяев Р.И. Ультразвуковая эласто-графия сдвиговой волной в диагностике опухолей поч-чек. *Ультразвуковая и функциональная диагностика*. 2015; 4: 17a. Amosov A.V., Krupinov G.E., Sorokin N.I. et al. Shear wave ultrasound elastography in the diagnosis of kidney tumors. *Ultrasound and Functional Diagnostics*. 2015; 4: 17a. (In Russian)
30. Борсуков А.В., Бекезин В.В., Козлова Е.Ю., Пересецкая О.В. Диагностические возможности ульт-развуковой эластографии почек у детей с метаболи-ческим синдромом. *Доктор.Ру*. 2016; 6: 52–56. Borsukov A.V., Bekezin V.V., Kozlova E.Yu., Peresetskaya O.V. Diagnostic possibilities of ultrasound elastography of the kidneys in children with metabolic syndrome. *Doctor.ru*. 2016; 6: 52–56. (In Russian)
31. Бекезин В.В., Борсуков А.В., Козлова Е.Ю. Влияние артериальной гипертензии у подростков с ожирением на состояние почек по данным эластографии сдвиго-вой волной. *Российский кардиологический журнал*. 2022; 27 (S6): 6. Bekezin V.V., Borsukov A.V., Kozlova E.Yu. The effect of arterial hypertension in obese adolescents on kidney condition according to shear wave elastography. *Russian Journal of Cardiology*. 2022; 27 (S6): 6. (In Russian)
32. Močnik M., Marčun Varda N. Ultrasound Elastography in Children. *Children (Basel)*. 2023; 10 (8): 1296. <http://doi.org/10.3390/children10081296>
33. Zhang Y.Y., Meng Z.J. Definition and classification of acute-on-chronic liver diseases. *Wld J. Clin. Cases*. 2022; 10 (15): 4717–4725. <http://doi.org/10.12998/wjcc.v10.i15.4717>
34. Herrmann E., de Lédinghen V., Cassinotto C. et al. Assessment of biopsy-proven liver fibrosis by two-dimensional shear wave elastography: An individual patient data-based meta-analysis. *Hepatology*. 2018; 67 (1): 260–272. <http://doi.org/10.1002/hep.29179>
35. Magri F., Chytiris S., Chiovato L. The role of elastography in thyroid ultrasonography. *Curr. Opin. Endocrinol. Diabetes Obes*. 2016; 23 (5): 416–422. <http://doi.org/10.1097/MED.0000000000000274>
36. Ricci P., Maggini E., Mancuso E. et al. Clinical application of breast elastography: state of the art. *Eur. J. Radiol*. 2014; 83(3): 429–437. <http://doi.org/10.1016/j.ejrad.2013.05.007>
37. Cui X.W., Li K.N., Yi A.J. et al. Ultrasound elastography. *Endosc. Ultrasound*. 2022; 11 (4): 252–274. <http://doi.org/10.4103/EUS-D-21-00151>
38. Zaffanello M., Bruno C. Clinical perspective on renal elasticity quantification by acoustic radiation force impulse: Where we are and where we are going. *Wld J. Clin. Urol*. 2015; 4 (1): 100–104. <http://doi.org/10.5410/wjcu.v4.i3.100>
39. Rizzo L., L'Abbate L., Attanasio M. et al. Depth effect on point shear wave velocity elastography: Evidence in a chronic hepatitis C patient cohort. *Ultrasound*. 2024; 32 (1): 53–61. <http://doi.org/10.1177/1742271X231183370>
40. Nery F., Szczepankiewicz F., Kerkelä L. et al. In vivo demonstration of microscopic anisotropy in the human kidney using multidimensional diffusion MRI. *Magn. Reson. Med*. 2019; 82 (6): 2160–2168. <http://doi.org/10.1002/mrm.27869>
41. Jiang B., Liu F., Fu H., Mao J. Advances in imaging techniques to assess kidney fibrosis. *Ren. Fail*. 2023; 45 (1): 2171887. <http://doi.org/10.1080/0886022X.2023.2171887>
42. Nishino T., Tomori S., Ono S. et al. Effect of proteinuria at relapse on shear wave velocity assessed using ultrasound elastography in children with idiopathic nephrotic syndrome. *J. Med. Ultrason*. 2024; 1 (1): 4. <http://doi.org/10.1007/s10396-024-01455-7>
43. Gonçalves L.M., Forte G.C., Holz T.G. et al. Shear wave elastography and Doppler ultrasound in kidney transplant recipients. *Radiol. Bras*. 2022; 55 (1): 19–23. <http://doi.org/10.1590/0100-3984.2020.0148>
44. Filipov T., Teutsch B., Szabó A. et al. Investigating the role of ultrasound-based shear wave elastography in kidney transplanted patients: correlation between non-invasive fibrosis detection, kidney dysfunction and biopsy results—a systematic review and meta-analysis. *J. Nephrol*. 2024; 1 (1): 8. <http://doi.org/10.1007/s40620-023-01856-w>



45. Kishimoto R., Kikuchi K., Koyama A. et al. Intra- and inter-operator reproducibility of US point shear-wave elastography in various organs: evaluation in phantoms and healthy volunteers. *Eur. Radiol.* 2019; 29 (11): 5999–6008. <http://doi.org/10.1007/s00330-019-06195-8>
46. Fang C., Konstantatou E., Romanos O. et al. Reproducibility of 2-Dimensional Shear Wave Elastography Assessment of the Liver: A Direct Comparison With Point Shear Wave Elastography in Healthy Volunteers. *J. Ultrasound Med.* 2017; 36 (8): 1563–1569. <http://doi.org/10.7863/ultra.16.07018>
47. Kim T.M., Ahn H., Cho J.Y. et al. Prediction of acute rejection in renal allografts using shear-wave dispersion slope. *Eur. Radiol.* 2023; 1 (1): 12. <http://doi.org/10.1007/s00330-023-10492-8>
48. Маджугин М.Л., Болоцков А.С., Дадаян А.Р., Фирсов М.С. Оценка жесткости паренхимы почек у практически здоровых пациентов методом эластографии сдвиговой волной. *Современные проблемы науки и образования.* 2024; 5: 2024. <https://science-education.ru/article/view?id=33646> <http://doi.org/10.17513/spno.33646>  
Madzhugin M.L., Bolotskov A.S., Dadayan A.R., Firsov M.S. Assessment of renal parenchyma stiffness in almost healthy patients by shear wave elastography. *Modern Problems of Science and Education.* 2024; 5: 2024. <https://science-education.ru/article/view?id=33646> <http://doi.org/10.17513/spno.33646> (In Russian)

**Для корреспонденции\*:** Маджугин Михаил Леонидович – e-mail: doctormi1982@gmail.com

**Маджугин Михаил Леонидович** – врач отделения УЗД ЧУЗ “Клиническая больница «РЖД-Медицина» г. Ростов-на-Дону”, Ростов-на-Дону. <https://orcid.org/0009-0003-1961-4141>.

**Болоцков Александр Сергеевич** – заведующий отделением УЗД ЧУЗ “Клиническая больница «РЖД-Медицина» г. Ростов-на-Дону”, Ростов-на-Дону. <https://orcid.org/0000-0002-6765-0724>.

**Фирсов Максим Сергеевич** – врач отделения УЗД ЧУЗ “Клиническая больница «РЖД-Медицина» г. Ростов-на-Дону”, Ростов-на-Дону. <https://orcid.org/0009-0009-3076-5577>.

**Дадаян Арсен Рудольфович** – врач-хирург хирургического отделения ГБУ РО “ЦГБ им. Н.А. Семашко в г. Ростов-на-Дону”, Ростов-на-Дону. <https://orcid.org/0000-0002-1766-305X>.

**Contact\*:** Mikhail L. Madzhugin – e-mail: doctormi1982@gmail.com

**Mikhail L. Madzhugin** – doctor, department of Ultrasound Diagnostics, Clinical Hospital “RZD-Medicine” in Rostov-on-Don, Rostov-on-Don. <https://orcid.org/0009-0003-1961-4141>

**Alexander S. Bolotskov** – Head of the Ultrasound Diagnostics Department, Clinical Hospital “RZD-Medicine”, Rostov-on-Don. <https://orcid.org/0000-0002-6765-0724>

**Maxim S. Firsov** – doctor, department of Ultrasound Diagnostics, Clinical Hospital “RZD-Medicine”, Rostov-on-Don. <https://orcid.org/0009-0009-3076-5577>.

**Arsen R. Dadayan** – surgeon, Surgical department, Central City Hospital N.A. Semashko in Rostov-on-Don, Rostov-on-Don. <https://orcid.org/0000-0002-1766-305X>.



# Эффективность включения в состав системы компьютерного анализа маммограмм блока идентификации и дифференцирования кальцинатов: результаты одноцентрового проспективного рандомизированного исследования

© Пасынков Д.В.<sup>1, 2, 3\*</sup>, Романычева Е.А.<sup>2</sup>, Егошин И.А.<sup>1</sup>, Колчев А.А.<sup>4</sup>,  
Меринов С.Н.<sup>2</sup>, Бусыгина О.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Марийский государственный университет» Министерства образования и науки России; 424000 Йошкар-Ола, пл. Ленина, д. 1, Российская Федерация

<sup>2</sup> ГБУ Республики Марий Эл «Республиканский клинический онкологический диспансер» Минздрава Республики Марий Эл; 424037 Йошкар-Ола, ул. Осипенко, д. 22, Российская Федерация

<sup>3</sup> Казанская государственная медицинская академия – филиал ФГБОУ ДПО «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования» Минздрава России; 420012 Казань, ул. Бутлерова, д. 36, Российская Федерация

<sup>4</sup> ФГАОУ ВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» Министерства образования и науки России; 420008 Казань, ул. Кремлевская, д. 18, Российская Федерация

**Цель исследования:** создание блока автоматической идентификации кальцинатов (БАИК) системы компьютерного анализа (CAD) маммограмм, позволяющего маркировать различные варианты кальцинатов молочной железы (МЖ), и оценка его клинической эффективности.

**Материал и методы.** Проведено проспективное рандомизированное исследование, в которое было включено 9078 пациенток, явившихся для выполнения маммографии. Все они были рандомизированы в соотношении 1:1 в контрольную группу (группу CAD), где выполнялась обработка маммограмм с помощью CAD MammCheck (без БАИК), и опытную группу, где дополнительно выполнялась обработка полученных маммограмм с помощью БАИК (группу CAD + БАИК). После первичного скрининга пациентки наблюдались в течение минимум 3 лет.

**Результаты.** В процессе визуального анализа маммограмм в группах CAD + БАИК и CAD было верифицировано 170 (3,74%) и 159 (3,50%;  $p = 0,3716$ ) случаев злокачественных новообразований МЖ соответственно. После анализа меток CAD было дополнительно верифицировано 10 и 6 случаев злокачественных новообразований МЖ соответственно ( $p = 0,8175$ ). В процессе последующего анализа меток БАИК в соответствующей группе было верифицировано 7 (0,15%) случаев рака МЖ (РМЖ). В итоге, в процессе первичного скрининга было верифицировано 187 и 165 случаев РМЖ соответственно ( $p = 0,0477$ ). В процессе последующего наблюдения в течение 3 лет в группе CAD + БАИК было идентифицировано 16 (0,35%) случаев РМЖ, впоследствии у 2 (0,04%) пациенток этой группы в зоне верифицированного РМЖ обнаруживались микрокальцинаты. В группе CAD соответствующие показатели составили 22 (0,48%) и 9 (0,20%) случаев соответственно ( $p = 0,054$ ).

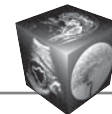
**Заключение.** Включение БАИК в структуру CAD обеспечивает достоверное (на 5,81%) повышение выявляемости РМЖ, проявляющихся кальцинатами, за счет небольшого (на 0,89%) повышения частоты вызова пациенток для дообследования.

**Ключевые слова:** маммография; рак молочной железы; кальцинаты; система компьютерного анализа

**Авторы подтверждают отсутствие конфликтов интересов.**

**Для цитирования:** Пасынков Д.В., Романычева Е.А., Егошин И.А., Колчев А.А., Меринов С.Н., Бусыгина О.В. Эффективность включения в состав системы компьютерного анализа маммограмм блока идентификации и дифференцирования кальцинатов: результаты одноцентрового проспективного рандомизированного исследования. *Медицинская визуализация*. 2025; 29 (1): 92–101. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1449>

**Поступила в редакцию:** 12.02.2024. **Принята к печати:** 27.11.2024. **Опубликована online:** 17.01.2025.



# Effectiveness of the calcification identification and discrimination module incorporated into the computer aided detection system for mammography: the results of the single-center, prospective, randomised study

© Dmitry V. Pasyukov<sup>1, 2, 3\*</sup>, Ekaterina A. Romanycheva<sup>2</sup>, Ivan A. Egoshin<sup>1, 4</sup>, Alexey A. Kolchev<sup>4</sup>, Sergey N. Merinov<sup>2</sup>, Olga V. Busygina<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Mari State University of the Ministry of Education and Science of Russian Federation, 1, Lenin square, Yoshkar-Ola 424000, Russian Federation

<sup>2</sup> Clinical Oncology Dispensary of Mari El Republic, Ministry of Health of Mari El Republic, 22, Osipenko str., Yoshkar-Ola 424037, Russian Federation

<sup>3</sup> Kazan State Medical Academy – Branch of Russian Medical Academy of Continuous Professional Education of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation; 36, Butlerov str., Kazan 420012, Russian Federation

<sup>4</sup> Kazan (Volga region) Federal University of the Ministry of Education and Science of Russian Federation; 18, Kremlevskaya str., Kazan 420008, Russian Federation

**Aim:** to develop the module of automated calcification identification (MACI) capable to mark the different types of breast calcifications and suitable for incorporation into the computer-aided detection (CAD) system for mammography, as well as to assess its clinical efficiency.

**Material and methods.** We performed prospective, randomized study included 9078 women who underwent the mammography. All the subjects were randomized (1:1) into the control (CAD) and experimental (CAD + MACI) arms. In the CAD arm the mammography images were processed with the help of CAD MammCheck (with no MACI). In the CAD + MACI arm we used the combined CAD and MACI image processing. After the primary screening completion the subjects were followed for minimum 3 years.

**Results.** During the visual mammography image analysis in the CAD + MACI и CAD arms 170 (3.74%) и 159 (3.50%;  $p = 0.3716$ ) breast carcinoma (BC) cases were proven, respectively. After the CAD markings analysis we additionally proven 10 and 6 BC cases, respectively ( $p = 0.8175$ ). During the subsequent MACI markings analysis in the CAD + MACI arm 7 (0.15%) BC cases were verified. Totally, during the primary screening we found 187 and 165 BC cases, respectively ( $p = 0.0477$ ). During the 3-year follow-up in the CAD + MACI arm 16 BC cases were proven (0.35%), of them in 2 (0.04%) cases the microcalcifications were found in the area of the subsequently verified BC. In the CAD arm the corresponding values were 22 (0.48%) and 9 (0.20%) BC cases ( $p = 0.054$ ).

**Conclusion.** MACI incorporation into the CAD design significantly increases (5.81%) the detection rate of BC associated with microcalcifications at the expense of small (0.89%) increase of the recall rate.

**Keywords:** mammography; breast carcinoma; calcification; computer aided detection

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

**For citation:** Pasyukov D.V., Romanycheva E.A., Egoshin I.A., Kolchev A.A., Merinov S.N., Busygina O.V. Effectiveness of the calcification identification and discrimination module incorporated into the computer aided detection system for mammography: the results of the single-center, prospective, randomised study. *Medical Visualization*. 2025; 29 (1): 92–101. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1449>

**Received:** 12.02.2024.

**Accepted for publication:** 27.11.2024.

**Published online:** 17.01.2025.

## Введение

В последние годы достигнуты весомые успехи в сфере диагностики и лечения рака молочной железы (РМЖ). Однако, несмотря на это, данная проблема сохраняет свою значимость как во всем мире, так и в Российской Федерации. Так, по данным 2020 г. во всем мире было зарегистрировано 2 261 419 новых случаев РМЖ, что составило

11,7% от всех случаев злокачественных новообразований у лиц обоего пола. Вместе с тем РМЖ был ответственен за 684 996 (6,9%) летальных исходов, что соответствовало пятому месту в структуре общей онкологической смертности. Среди женщин данная патология является лидером в структуре онкологической заболеваемости (24,5%) и занимает второе место (15,5 %) по коли-



честву ассоциированных с ней летальных случаев [1]. В Российской Федерации наблюдается схожая тенденция: за последнее десятилетие (с 2012 по 2022 г.) отмечался рост распространенности РМЖ с 380,5 до 526,4 случая на 100 000 населения. Это сопровождалось повышением индекса накопления (с 9,7 – в 2012 г. до 11,2 – в 2022 г.), а также 5-летней выживаемости (с 57,9% – в 2012 г. до 63,9% – в 2022 г.) и явилось результатом повышения доли опухолей, выявленных в I–II стадиях (64,5% – в 2012 г. и 73,7% – в 2022 г.), что привело к снижению одногодичной летальности почти вдвое (с 8,3% – в 2012 г. до 4,6% – в 2022 г.) [2]. Очевидно, что важный вклад в достижение данных результатов внесло массовое распространение популяционного скрининга РМЖ.

Рентгеновская маммография (МГ) в настоящее время расценивается как единственный метод, пригодный для проведения популяционного скрининга РМЖ. В частности, были продемонстрированы убедительные данные о том, что она обеспечивает снижение смертности при РМЖ у женщин 50–69 лет и 70–74 лет и может являться экономически эффективной среди женщин первой из этих возрастных групп в странах с высокой заболеваемостью РМЖ [3]. Это объясняется тем, что МГ является уникальным методом диагностики, способным обнаруживать данное заболевание на стадии раннего инвазивного и преинвазивного РМЖ, характеризующегося ограниченной способностью к лимфогематогенному метастазированию. Эти формы РМЖ часто имеют малые размеры и зачастую ассоциированы с образованием мелких (менее 1 мм) множественных кальцинатов, имеющих высокую рентгеновскую плотность и визуализирующихся только при МГ, но не при других исследованиях молочных желез (МЖ) [4, 5].

В последние годы отмечается повсеместный интерес к разработке и внедрению различных цифровых технологий в медицинскую практику. Хорошо известно, что использование цифровых инструментов способно повысить и чувствительность, и специфичность традиционных лучевых исследований [6]. Ранее нами была разработана подобная система MammCheck II для анализа маммографических изображений и была продемонстрирована ее способность автоматически идентифицировать и маркировать подозрительные области с различными характеристиками на маммограмме [7]. Данная система позволила обнаружить малые РМЖ (до 1 см) с очаговым ростом в 92,31% случаев, РМЖ, проявляющиеся в виде асимметрии, – в 72,2% случаев, частично срезан-

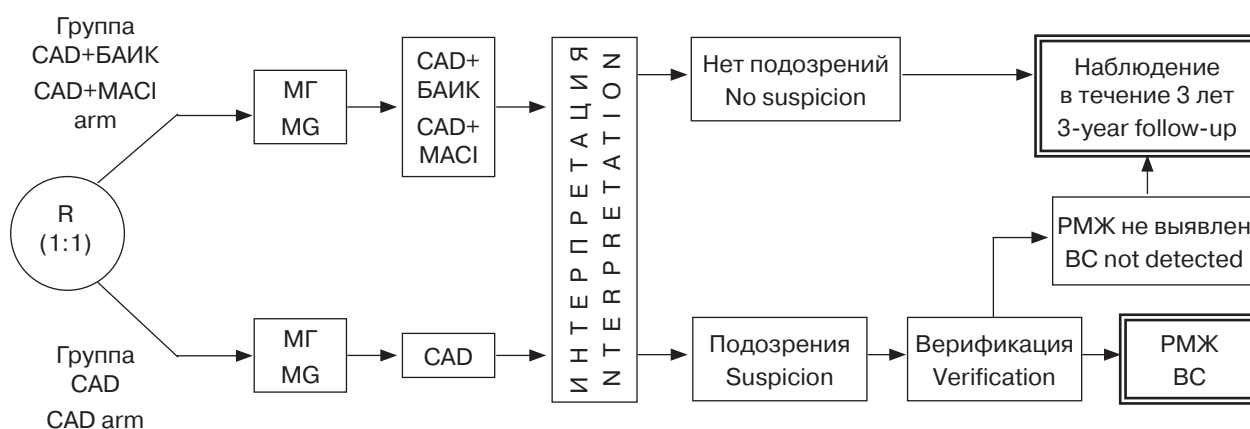
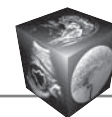
ные образования – в 94,4% случаев и образования, плохо видимые или вообще невидимые на стандартных МГ ввиду плотной паренхимы (ACR C-D), – в 70,0% случаев. В результате общая частота обнаружения подозрительных образований составила 90,73% (323 из 356 случаев) [8]. Также была продемонстрирована способность данной системы ретроспективно в 86,7% случаев идентифицировать участки изменений, которые, как выяснилось впоследствии, соответствовали раннему РМЖ, в среднем на 2 года раньше фактической постановки диагноза [9]. Однако данная система предполагала идентификацию, в первую очередь, вариантов РМЖ, проявляющихся объемными образованиями и специально не предназначена для автоматического обнаружения скоплений микрокальцинатов, не ассоциированных с объемными образованиями.

**Цель исследования:** создание блока данной системы, позволяющего автоматически идентифицировать и маркировать различные варианты кальцинатов МЖ, и оценка клинической эффективности его применения в рутинном скрининге РМЖ.

## Материал и методы

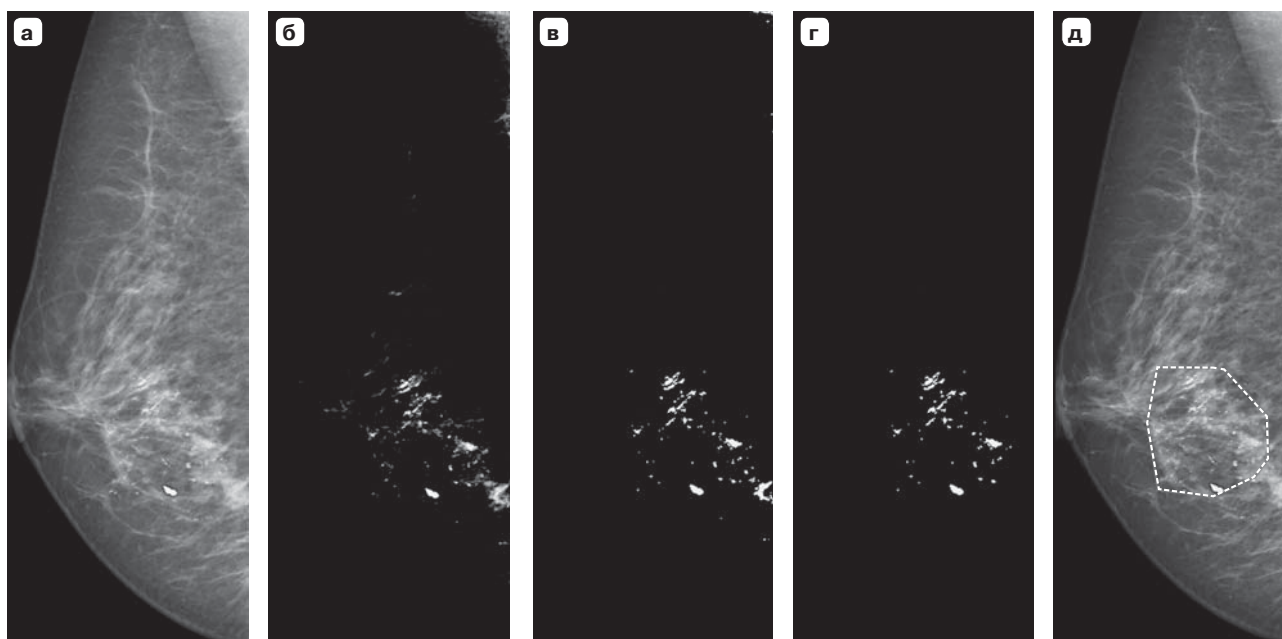
### Пациенты и дизайн исследования

В исследование было включено 9078 пациенток, которые явились для выполнения МГ. Все они были рандомизированы в две группы в соотношении 1:1 с последующим выполнением стандартной МГ в краниокаудальной и медиолатеральной косой проекциях и визуальным анализом полученных изображений. Сопоставления групп по каким-либо признакам не производилось. Затем пациенткам контрольной группы (группы системы компьютерного анализа – CAD) выполнялась обработка полученных маммограмм с помощью ранее разработанной CAD, не содержавшей блока автоматической идентификации кальцинатов (БАИК). Пациенткам опытной группы (группы CAD + БАИК) дополнительно выполнялась обработка полученных маммограмм с помощью БАИК. Затем производили анализ промаркированных участков и при констатации подозрения на РМЖ – дополнительные исследования (в том числе прицельное УЗИ и/или пункционную биопсию промаркированных зон). В итоге 4537 пациенток были распределены в группу CAD (контрольную) и 4541 – в группу CAD + БАИК (опытную). После завершения первичного скрининга пациентки наблюдались в течение минимум 3 лет с целью верификации исходно отрицательных результатов (рис. 1).



**Рис. 1.** Схема дизайна исследования. R – рандомизация; МГ – маммография; CAD – система компьютерного анализа; БАИК – блок автоматической идентификации кальцинатов; РМЖ – рак молочной железы. Двойной рамкой выделены варианты завершения участия в исследовании.

**Fig. 1.** Study design. R – randomization; MG – mammography; CAD – computer-aided detection system; MACI – module of automated calcification identification; BC – breast carcinoma. The possible options of study discontinuation are bounded with double frames.



**Рис. 2.** Пример работы отдельных компонентов блока автоматической идентификации кальцинатов. **а** – исходное изображение; **б** – результат нелинейной фильтрации; **в** – результат бинаризации результата нелинейной фильтрации; **г** – результат фильтрации по скорости перепада; **д** – результат кластеризации (финальный результат работы; кластер кальцинатов окружен пунктирной линией).

**Fig. 2.** The example of the separate component outcomes for the calcification identification module. **a** – input image; **б** – output image after the non-linear filtering; **в** – output image after the binarization of the nonlinear filtration results; **г** – output image after the drop velocity filtering; **д** – clusterization output (the final outcome image; calcifications cluster is surrounded by the dotted line).



### Методы

МГ выполнялась по стандартной методике на цифровой системе Siemens Mammomat Fusion. Для автоматизированного анализа маммограмм использовали CAD собственной разработки MammCheck II [7]. Данная система обеспечивала автоматическую идентификацию объемных образований, но не имела блока специфичной идентификации скоплений кальцинатов, не ассоциированных с объемными образованиями.

Позднее для данной системы был разработан блок автоматической идентификации кальцинатов, в котором был реализован трехэтапный подход. На первом этапе производилась нелинейная фильтрация исходного маммографического изображения с последующей бинаризацией. В результате серошкальное изображение становилось черно-белым, где белыми являлись вероятные зоны залегания кальцинатов. На втором этапе производилось дифференцирование истинных кальцинатов от других высокоинтенсивных структур путем анализа скорости перепада интенсивности сигнала по контуру вероятной зоны залегания кальцината (для истинных кальцинатов данный перепад является более резким). На последнем этапе производилась группировка отдельных кальцинатов в скопления с помощью плотностного алгоритма пространственной кластеризации с присутствием шума (рис. 2). Затем осуществлялась бинарная классификация идентифицированных кальцинатов и их скоплений на подозрительные (выделялись красным маркером) и доброкачественные (рутинно не маркировались, но могли маркироваться зеленым цветом опционально).

### Статистическая обработка

В качестве параметров описательной статистики для непрерывных нормально распределенных выборок рассчитывали среднее арифметическое и стандартное отклонение, для ненормально распределенных – медиану и размах вариации. Для категориальных переменных рассчитывали частоты в виде количества (процента) наблюдений. Сравнение нормально распределенных выборок производили с использованием *t*-критерия Стьюдента, ненормально распределенных – с использованием критериев Уилкоксона и  $\chi^2$  (для сравнения долей). Оценка нормальности распределения выборок осуществлялась с использованием критерия Колмогорова–Смирнова. Статистическую достоверность различия сравниваемых выборок констатировали при получении значений  $p < 0,05$ . Все статистические анализы выполняли в программном пакете SPSS 13.0.

### Результаты исследования

Средний возраст пациенток группы CAD составил  $50,61 \pm 13,70$  года, группы CAD + БАИК –  $51,03 \pm 12,92$  года ( $p > 0,05$ ). В процессе первичного визуального анализа маммограмм в группе CAD + БАИК было констатировано 285 (6,28%) случаев подозрения на РМЖ, в группе CAD – 260 (5,73%;  $p = 0,1743$ ) аналогичных случаев. Из них в процессе дальнейшего обследования было верифицировано 170 (3,74%) и 159 (3,50%;  $p = 0,3716$ ) случаев злокачественных новообразований МЖ соответственно.

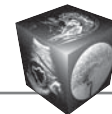
После анализа меток CAD было дополнительно констатировано 98 (2,16%) случаев подозрения на РМЖ в группе CAD + БАИК и 82 (1,81%;  $p = 1,4365$ ) аналогичных случаев в группе CAD. Из них в процессе дальнейшего обследования было верифицировано 10 и 6 случаев злокачественных новообразований МЖ соответственно ( $p = 0,8175$ ).

В процессе последующего анализа меток БАИК в соответствующей группе было дополнительно констатировано 23 (0,51%) случая подозрения на РМЖ, из которых в 7 (0,15%) случаях были верифицированы злокачественные новообразования МЖ (табл. 1).

Таким образом, в процессе первичного скрининга в рамках исследования дополнительные исследования с целью дифференцирования подозрительных зон (прицельное УЗИ и/или пункционная биопсия) потребовались у 383 (8,43%) пациенток в группе CAD + БАИК и у 342 (7,54%) пациенток в группе CAD и, в итоге, было верифицировано 187 и 165 случаев злокачественных новообразований МЖ соответственно ( $p = 0,0477$ ).

В процессе последующего наблюдения в течение 3 лет в группе CAD + БАИК было идентифицировано 16 (0,35%) случаев РМЖ, впоследствии у 2 (0,04%) пациенток этой группы в зоне верифицированного РМЖ обнаруживались микрокальцинаты. В группе CAD соответствующие показатели составили 22 (0,48%) и 9 (0,20%) случаев соответственно ( $p = 0,054$  для сравнения частоты РМЖ, ассоциированного с кальцинатами). Все эти случаи были подвергнуты ретроспективному анализу на предмет возможности идентификации РМЖ в предыдущих точках скрининга (табл. 2).

Из 10 случаев, когда изменения, соответствовавшие РМЖ, определялись на предыдущих маммограммах, кальцинаты выявлялись только в 2 случаях и только в группе CAD. Остальные случаи в обеих группах соответствовали гиперденсным образованиям, не дифференцировавшимся на фоне неоднородно плотной нодулярной паренхимы и не ассоциированными с кальцинатами. Средний размер измененной зоны по данным МГ



**Таблица 1.** Распределение выявленных в процессе первичного скрининга РМЖ по типам маммографических проявлений

**Table 1.** The distribution of BC detected during the primary screening by the mammographic appearance

| Группа<br>Group          | Вид изменения / Type of change                                                    |                                                                         |                                                                          |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
|                          | гиперденсная зона<br>без кальцинатов<br>hyperdense area<br>with no calcifications | кальцинаты на жировом фоне<br>calcifications on the fatty<br>background | гиперденсная зона +<br>кальцинаты<br>hyperdense area +<br>calcifications |
| CAD + БАИК<br>CAD + MACI | 134 (71.66%)                                                                      | 7 (3.74%)                                                               | 46 (24.60%)                                                              |
| CAD                      | 124 (75.15%)                                                                      | 2 (1.21%)                                                               | 39 (23.64%)                                                              |
| Всего / Total            | 258 (73.29%)                                                                      | 9 (2.56%)                                                               | 85 (24.15%)                                                              |

**Таблица 2.** Распределение выявленных в процессе 3-летнего наблюдения РМЖ по типам маммографических проявлений

**Table 2.** The distribution of BC detected during the 3-year follow-up by the mammographic appearance

| Группа<br>Group                                      | Выявлено / определялось ретроспективно в год первичного скрининга<br>Detected / found retrospectively on the initial screening mammography images |                                                                            |                                                                          |                 |
|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-----------------|
|                                                      | гиперденсная зона<br>без кальцинатов<br>hyperdense area<br>with no calcifications                                                                 | кальцинаты<br>на жировом фоне<br>calcifications on the<br>fatty background | гиперденсная зона +<br>кальцинаты<br>hyperdense area +<br>calcifications | всего<br>total  |
| <b>Первый год наблюдения / 1st year of follow-up</b> |                                                                                                                                                   |                                                                            |                                                                          |                 |
| CAD + БАИК<br>CAD + MACI                             | 3 (18.75%) / 0                                                                                                                                    | –                                                                          | –                                                                        | 3 (18.75%) / 0  |
| CAD                                                  | 2 (9.09%) / 1                                                                                                                                     | –                                                                          | 2 (9.09%) / 2                                                            | 4 (18.18%) / 3  |
| <b>Всего / Total</b>                                 | <b>5 / 1</b>                                                                                                                                      | <b>–</b>                                                                   | <b>2 / 2</b>                                                             | <b>7 / 3</b>    |
| <b>Второй год наблюдения / 2nd year of follow-up</b> |                                                                                                                                                   |                                                                            |                                                                          |                 |
| CAD + БАИК<br>CAD + MACI                             | 4 (25.00%) / 1                                                                                                                                    | –                                                                          | 1 (6.25%) / 0                                                            | 5 (31.25%) / 1  |
| CAD                                                  | 4 (18.18%) / 2                                                                                                                                    | 1 (4.55%) / 0                                                              | 2 (9.09%) / 0                                                            | 7 (31.82%) / 2  |
| <b>Всего / Total</b>                                 | <b>8 / 3</b>                                                                                                                                      | <b>1 / 0</b>                                                               | <b>3 / 0</b>                                                             | <b>12 / 3</b>   |
| <b>Третий год наблюдения / 3rd year of follow-up</b> |                                                                                                                                                   |                                                                            |                                                                          |                 |
| CAD + БАИК<br>CAD + MACI                             | 6 (37.50%) / 0                                                                                                                                    | –                                                                          | 2 (12.50%) / 1                                                           | 8 (50.00%) / 1  |
| CAD                                                  | 7 (31.82%) / 2                                                                                                                                    | 1 (4.55%) / 0                                                              | 3 (13.64%) / 2                                                           | 11 (50.01%) / 4 |
| <b>Всего / Total</b>                                 | <b>13 / 2</b>                                                                                                                                     | <b>1 / 0</b>                                                               | <b>5 / 3</b>                                                             | <b>19 / 5</b>   |
| <b>Итого / Grand Total</b>                           | <b>26 / 6</b>                                                                                                                                     | <b>2 / 0</b>                                                               | <b>10 / 5</b>                                                            | <b>38 / 11</b>  |

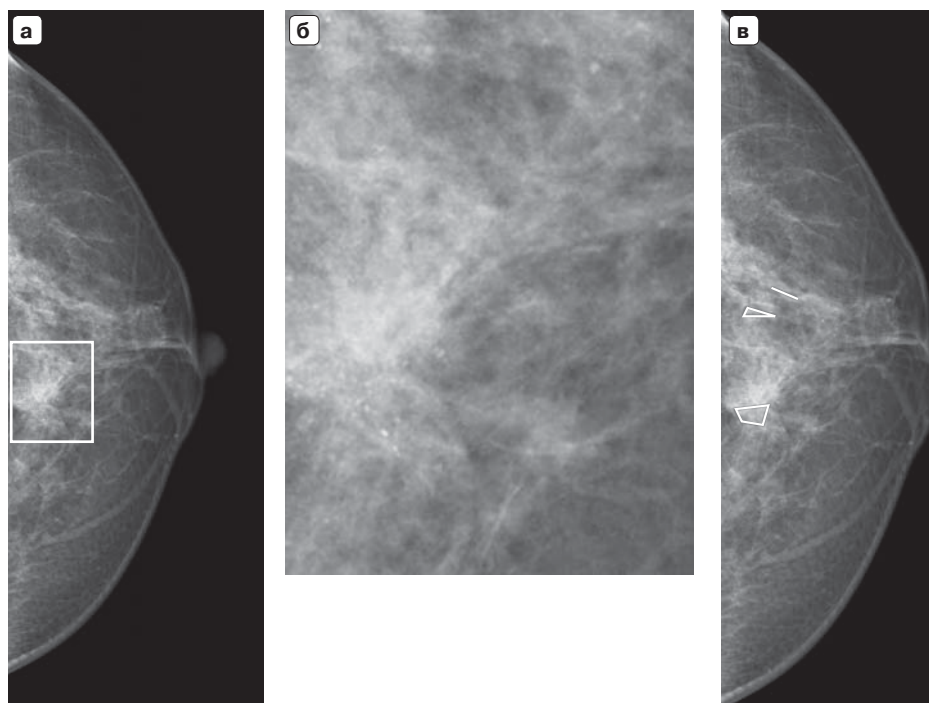
*Примечание.* Сумма процентов может не соответствовать 100% ввиду округления.

*Note.* The percent sum may not correspond to 100% due to the rounding.



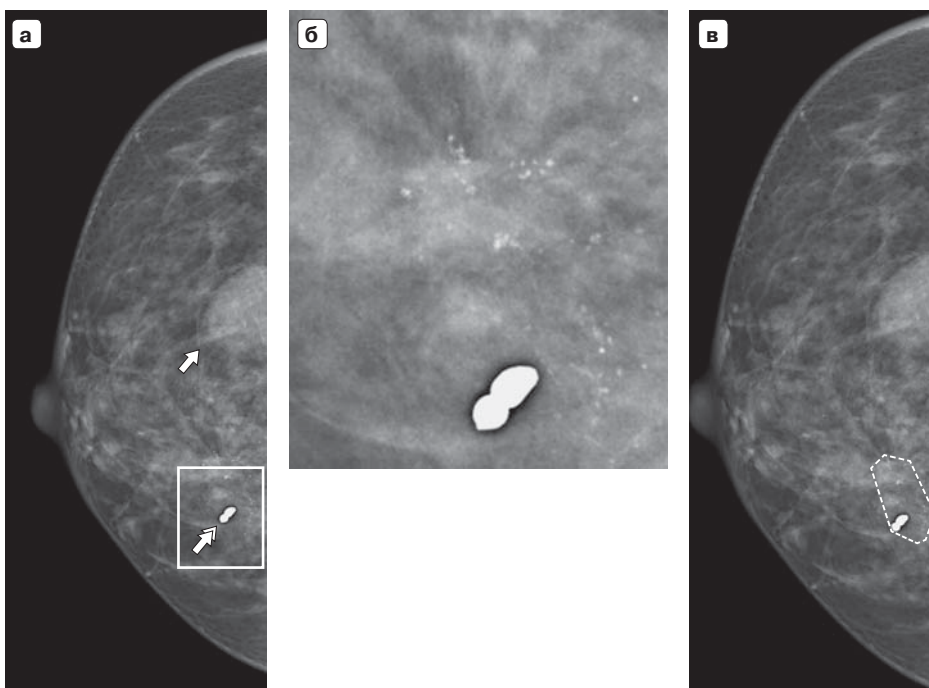
**Рис. 3.** Скопление мелких низкоинтенсивных кальцинатов на фоне плотной паренхимы, идентифицированное ретроспективно. **а** – краниокаудальная маммограмма правой МЖ, на которой с трудом определяется скопление мелких полиморфных кальцинатов; **б** – область интереса, выделенная рамкой на рис. 3а, увеличенная в 3 раза; **в** – результат работы БАИК.

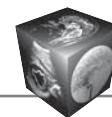
**Fig. 3.** The cluster of low-intensity calcifications on the dense parenchymal background that was identified retrospectively. **a** – craniocaudal mammography image of the right breast shows the hardly detectable cluster of small pleomorphic calcifications; **б** – 3× enlarged region of interest shown with frame on fig. 3a; **в** – MACI outcome.



**Рис. 4.** Скопление мелких низкоинтенсивных кальцинатов на фоне плотной паренхимы, ассоциированное с более четко видимыми изменениями и идентифицированное ретроспективно. **а** – краниокаудальная маммограмма правой МЖ, на которой наряду со скоплением мелких полиморфных кальцинатов определяются гиперденсное образование овальной формы с частично нечетким контуром (стрелка) и крупный хлопьевидный кальцинат (двойная стрелка); **б** – область интереса, выделенная рамкой на рис. 4а, увеличенная в 3 раза; **в** – результат работы БАИК.

**Fig. 4.** The cluster of small low-intensity calcifications on the dense parenchymal background associated with other clearly visible changes. This cluster was detected retrospectively. **a** – craniocaudal mammography image of the right breast shows the hyperdense oval lesion with partly indistinct contour (arrow) and the large popcorn calcification (doubled arrow) in addition to the cluster of small pleomorphic calcifications; **б** – 3× enlarged region of interest shown with frame on fig. 4a; **в** – MACI outcome.





в случаях РМЖ, ассоциированных с микрокальцинатами, составил  $8,50 \pm 4,11$  мм. В обоих случаях пациентки не направлялись для выполнения биопсии ввиду того, что изменения, которые, как выяснилось впоследствии, соответствовали РМЖ, не были идентифицированы или не были расценены как подозрительные. Все эти случаи пришлось на скопления низкоинтенсивных кальцинатов малых размеров, расположенные на фоне паренхимы высокой плотности, что, по-видимому, затрудняло визуальное их выявление. При этом данные зоны были ретроспективно промаркированы БАИК (рис. 3). Особой проблемой являлась ассоциация нечетко определяющихся кальцинатов с хорошо видимыми изменениями другого типа (рис. 4), которые, как известно, способны отвлечь на себя внимание рентгенолога [9].

В итоге, в общей сложности было выявлено 203 (4,47%) случая РМЖ в группе CAD + БАИК и 187 (4,12%) таких случаев в группе CAD ( $p = 0,3952$ ).

### Обсуждение

МГ обладает высокой чувствительностью в выявлении РМЖ *in situ* (DCIS) и является основным методом диагностики данных форм РМЖ, а также его вариантов размером менее 1 см. В мире частота встречаемости DCIS составляет 20–40% от всех вновь выявляемых РМЖ. Клинические проявления данной формы РМЖ довольно скудны, поэтому большая их часть диагностируется при скрининговой МГ, при которой признаками данной патологии являются подозрительные микрокальцинаты. В одном из исследований было показано, что средняя частота DCIS по результатам маммографического скрининга составила 1,6 на 1000 женщин (медиана – 1,50 [размах вариации: 0,54–3,56] на 1000 женщин), и была продемонстрирована достоверная отрицательная корреляция выявленных при скрининге случаев DCIS с частотой последующего развития интервальных случаев инвазивного РМЖ (коэффициент регрессии Пуассона:  $-0,084$  [95% ДИ:  $-0,13, -0,03$ ];  $p = 0,002$ ). Было также показано, что выявление каждого трех случаев DCIS при скрининге приводило к снижению выявления инвазивного интервального РМЖ в последующие 3 года на один случай [10]. В ходе другого исследования было показано, что каждое увеличение периода задержки хирургического лечения приблизительно на 30 дней у пациенток с DCIS увеличивало риск развития инвазивного РМЖ и, как следствие, неблагоприятного исхода (дополнительный относительный риск (ОР) летального исхода составлял 7,4%; ОР: 1,07; 95% ДИ: 1,05–1,10;  $p < 0,001$ ) [11].

Кальцинаты в МЖ представляют собой отложения солей кальция, которые гиперденсны при МГ. Они чрезвычайно распространены и выявляются примерно в 85% случаев МГ. Большинство из них доброкачественной природы, но они также могут быть ассоциированы со злокачественными процессами в МЖ. В программе скрининговой МГ частота выявления кальцинатов составила 1,7%, из них только 19% были ассоциированы с РМЖ. В эпоху цифровой МГ частота диагностики РМЖ, ассоциированного с кальцинатами, колеблется от 1,9 до 3,2 на 1000 обследованных женщин. В трети случаев РМЖ кальцинаты являются единственным подозрительным признаком, выявляемым при МГ. Поэтому представляется важным не только уверенно идентифицировать кальцинаты на маммограмме, но и дифференцировать их, что позволит избежать ненужных интервенционных вмешательств при доброкачественных процессах [12]. До 50% случаев РМЖ могут быть ассоциированы с кальцинатами, в то время как 15–30% кальцинатов, подвергшихся биопсии в силу разных причин, соответствуют предраковым процессам у бессимптомных пациенток [13].

Анализ маммограмм врачом-рентгенологом включает визуальную оценку и интерпретацию полученных данных с последующим принятием соответствующего диагностического решения. Несмотря на усовершенствование технических характеристик маммографов и внедрение цифровых технологий, сохраняется высокий процент ошибок интерпретации данных изображений с получением как ложноположительных, так и ложноотрицательных результатов. При этом пропускается от 10 до 30% случаев РМЖ. В то же время у 80% женщин, приглашенных для дополнительного обследования, не было выявлено патологических изменений, при этом 40% подвергшихся биопсии пациенток имели изменения доброкачественного характера. Исследования показали, что большинство пропущенных случаев РМЖ на самом деле были видны при МГ, но либо остались незамеченными, либо были ошибочно интерпретированы как доброкачественные [14]. В целом ошибки в лучевой диагностике можно условно разделить на три типа: ошибки поиска, ошибки обнаружения и ошибки интерпретации. Первые два варианта ошибок возникают в случаях, когда присутствующие в зоне сканирования патологические изменения являются видимыми, но не распознаются врачом в силу каких-либо причин [15]. В частности, могут возникать проблемы при обнаружении микрокальцинатов на фоне плотных тканей МЖ. Поэтому разработка средств, предназначенных для помощи рентгенологу в поиске и обнаружении



патологических процессов МЖ, в частности микрокальцинатов, является важной и актуальной задачей. На современном этапе повысить точность диагностики становится возможным благодаря внедрению в клиническую практику САД, которые акцентируют внимание врача на подозрительных областях на изображениях [9]. В частности, было показано, что применение ранее разработанной нами САД для МГ MammCheck II с целью предварительной разметки маммограмм с последующим прицельным УЗИ промаркированных зон повысило выявление раннего РМЖ на 14,3% ( $p < 0,05$ ), что привело к достоверному повышению 3-годовой безрецидивной выживаемости пациенток [16].

### Заключение

Включение в структуру системы компьютерного анализа маммограмм отдельного блока автоматической идентификации кальцинатов обеспечивает достоверное (на 5,81%) повышение выявляемости РМЖ, проявляющихся данными изменениями, за счет небольшого (на 0,89%) повышения частоты вызова пациенток для дообследования при пограничном снижении частоты выявления РМЖ в процессе 3-летнего последующего наблюдения.

**Источник финансирования и конфликт интересов.** Основные результаты разделов "Материал и методы" и "Результаты" получены Д.В. Пасынковым и И.А. Егошиным при поддержке гранта Российского научного фонда №24-21-00031. <https://rscf.ru/project/24-21-00031/>.

### Участие авторов

Пасынков Д.В. – концепция и дизайн исследования.  
Романыхева Е.А. – сбор и обработка данных, подготовка черновика рукописи.

Егошин И.А. – математическая и программная реализация.

Колчев А.А. – математическая и программная реализация.

Меринов С.Н. – сбор данных.

Бусыгина О.В. – сбор данных.

Все авторы утвердили окончательный вариант рукописи.

### Authors' participation

Pasyunkov D.V. – study concept and design.  
Romanycheva E.A. – data collection and processing, draft manuscript preparation.

Egoshin I.A. – mathematical approach and software development.

Kolchev A.A. – mathematical approach and software development.

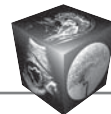
Merinov S.N. – data collection.

Busygina O.V. – data collection.

All the authors approved 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; 7 (3): 209–249. <https://doi.org/10.3322/caac.21660>
2. Каприн А.Д., Старинский В.В., Шахзадова А.О. Состояние онкологической помощи населению России в 2022 году. М.: МНИОИ им. П.А. Герцена филиал ФГБУ "НМИЦ радиологии" Минздрава России, 2022. 239 с.  
Kaprin A.D., Starinsky V.V., Shakhzadova A.O. The current state of the oncology care in the Russia in 2020. Moscow, 2021. 239 p. (In Russian)
3. Lauby-Secretan B., Scoccianti C., Loomis D. et al. Breast-cancer screening – viewpoint of the IARC Working Group. *New Engl. J. Med.* 2015; 372 (24): 2353–2358. <https://doi.org/10.1056/NEJMs1504363>
4. Громов А.И., Комин Ю.А., Мозеров С.А., Красницкая С.К. Ультразвуковой мерцающий артефакт в дифференциальной диагностике кальцинатов молочных желез. *Медицинская визуализация.* 2021; 25 (3): 157–166. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1025>  
Gromov A.I., Komin Yu.A., Mozerov S.A., Krasnickaya S.K. Twinkling artifact in differential diagnosis of mammary calcinates. *Medical Visualization.* 2021; 25 (3): 157–166. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1025> (In Russian)
5. Duffy S.W., Tabár L., Yen A. M.-F. et al. Beneficial Effect of Consecutive Screening Mammography Examinations on Mortality from Breast Cancer: A Prospective Study. *Radiology.* 2021; 299: 541–547. <https://doi.org/10.1148/radiol.2021203935>
6. Masud R., Al-Rei M., Lokker C. Computer-Aided Detection for Breast Cancer Screening in Clinical Settings: Scoping Review. *JMIR Med Inform.* 2019; 7 (3): e12660. <https://doi.org/10.2196/12660>
7. Egoshin I., Pasyunkov D., Kolchev A. et al. A segmentation approach for mammographic images and its clinical value (2018). *2017 IEEE International Conference on Microwaves, Antennas, Communications and Electronic Systems, COMCAS 2017, 2018-January*: 1–6. <https://doi.org/10.1109/COMCAS.2017.8244764>
8. Пасынков Д.В., Егошин И.А., Колчев А.А., Ключкин И.В., Бусыгина О.В. Сравнительный анализ диагностической ценности систем компьютерного анализа маммограмм I и II поколений. *Медицинская визуализация.* 2017; 1: 90–102. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-2017-1-90-102>  
Pasyunkov D.V., Egoshin I.A., Kolchev A.A., et al. Diagnostic Value of 1st and 2nd Generation Computer Aided Detection Systems for Mammography: a Comparative Assessment. *Medical Visualization.* 2017; 1: 90–102. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-2017-1-90-102> (In Russian)
9. Пасынков Д.В., Егошин И.А., Колчев А.А., Ключкин И.В., Пасынкова О.О. Эффективность системы компьютерного анализа маммограмм в диагностике вариантов рака молочной железы, трудно выявляемых при скрининговой маммографии. *Russian Electronic Journal of Radiology.* 2019; 9 (2): 107–118. <https://doi.org/10.21569/2222-7415-2019-9-2-107-118>  
Pasyunkov D.V., Egoshin I.A., Kolchev A.A. et al. The value of computer aided detection system in breast cancer difficult to detect at screening mammography. *Russian*



- Electronic Journal of Radiology*. 2019; 9 (2): 107–118. <https://doi.org/10.21569/2222-7415-2019-9-2-107-118> (In Russian)
10. Duffy S.W., Dibden A., Michalopoulos D. et al. Screen detection of ductal carcinoma in situ and subsequent incidence of invasive interval breast cancers: a retrospective population-based study. *Lancet Oncol*. 2016; 17 (1): 109–114. [https://doi.org/10.1016/S1470-2045\(15\)00446-5](https://doi.org/10.1016/S1470-2045(15)00446-5)
  11. Ward W.H., DeMora L., Handorf E. et al. Preoperative delays in the treatment of DCIS and the associated incidence of invasive breast cancer. *Ann. Surg. Oncol*. 2020; 27 (2): 386–396. <https://doi.org/10.1245/s10434-019-07844-4>
  12. Horvat J.V., Keating D.M., Rodrigues-Duarte H. et al. Calcifications at Digital Breast Tomosynthesis: Imaging Features and Biopsy Techniques. *Radiographics*. 2019; 39 (2): 307–318. <https://doi.org/10.1148/rg.2019180124>
  13. Scott R., Kendall C., Stone N. Elemental vs. phase composition of breast calcifications. *Sci. Rep*. 2017; 7: 136. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-00183-y>
  14. Ekpo E., Alakhras M., Brennan P. Errors in Mammography Cannot be Solved Through Technology Alone. *Asian Pacific J. Cancer Prevention*. 2018; 19 (2): 291–301. <https://doi.org/10.22034/APJCP.2018.19.2.291>
  15. Кузнецов А.А., Климова Н.В. Возможности программы поиска скоплений микрокальцинатов на цифровых маммограммах для повышения эффективности диагностики рака молочной железы. *Вестник СурГУ. Медицина*. 2022; 3 (53): 46–50. <https://doi.org/10.34822/2304-9448-2022-3-46-50>
  - Kuznetsov A.A., Klimova N.V. Possibilities of Using the Program for Detecting Clusters of Microcalcifications on Digital Mammograms to Advance Breast Cancer Diagnosis. *Vestnik SurGU. Medicina*. 2022; 3 (53): 46–50. <https://doi.org/10.34822/2304-9448-2022-3-46-50> (In Russian)
  16. Хасанов Р.Ш., Тухбатуллин М.Г., Пасынков Д.В. Эффективность применения системы компьютерного анализа маммограмм при скрининге рака молочной железы: одноцентровое, проспективное, рандомизированное клиническое исследование. *Вопросы онкологии*. 2021; 67 (6): 777–784. <https://doi.org/10.37469/0507-3758-2021-67-6-777-784>
  - Khasanov R.Sh., Tukhbatullin M.G., Pasyнков D.V. The value of computer aided detection system for mammography in the breast cancer screening: single-center, prospective, randomized clinical trial. *Problems in Oncology*. 2021; 67 (6): 777–784. <https://doi.org/10.37469/0507-3758-2021-67-6-777-784> (In Russian)

**Для корреспонденции\*:** Пасынков Дмитрий Валерьевич – e-mail: [passynkov@mail.ru](mailto:passynkov@mail.ru)

**Пасынков Дмитрий Валерьевич** – канд. мед. наук, доцент, заведующий кафедрой лучевой диагностики, онкологии ФГБОУ ВО “Марийский государственный университет” Минобрнауки России; заведующий отделением лучевой диагностики ГБУ “Республиканский клинический онкологический диспансер” Минздрава Республики Марий Эл, Йошкар-Ола; ассистент кафедры ультразвуковой диагностики Казанской государственной медицинской академии – филиала ФГБОУ ДПО “Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования” Минздрава России, Казань. <https://orcid.org/0000-0003-1888-2307>

**Романьева Екатерина Андреевна** – врач-рентгенолог отделения лучевой диагностики ГБУ “Республиканский клинический онкологический диспансер” Минздрава Республики Марий Эл, Йошкар-Ола. <https://orcid.org/0000-0002-0254-092X>

**Егошин Иван Александрович** – младший научный сотрудник научного сектора ФГБОУ ВО “Марийский государственный университет” Минобрнауки России, Йошкар-Ола. <https://orcid.org/0000-0003-0717-0734>

**Колчев Алексей Анатольевич** – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры радиоастрономии ФГАОУ ВПО “Казанский (Приволжский) федеральный университет” Минобрнауки России, Казань. <https://orcid.org/0000-0002-1692-2558>

**Меринов Сергей Николаевич** – врач-рентгенолог отделения лучевой диагностики ГБУ “Республиканский клинический онкологический диспансер” Минздрава Республики Марий Эл, Йошкар-Ола. <https://orcid.org/0000-0001-5689-8815>

**Бусыгина Ольга Валерьевна** – врач-рентгенолог отделения лучевой диагностики ГБУ “Республиканский клинический онкологический диспансер” Минздрава Республики Марий Эл, Йошкар-Ола. <https://orcid.org/0000-0001-7513-2217>

**Contact\*:** Dmitry V. Pasyнков – e-mail: [passynkov@mail.ru](mailto:passynkov@mail.ru)

**Dmitry V. Pasyнков** – Cand. of Sci. (Med.), Associate Professor, Head of department of radiology and oncology, Mari State University; Head of department of radiology of the Clinical Oncology Dispensary of Mari El Republic, Yoshkar-Ola; Assistant Professor, Department of Diagnostic Ultrasound, Kazan State Medical Academy – Branch Campus of the Federal State Budgetary Educational Institution of Further Professional Education “Russian Medical Academy of Continuous Professional Education” of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Kazan. <https://orcid.org/0000-0003-1888-2307>

**Ekaterina A. Romanycheva** – radiologist of department of radiology of the Clinical Oncology Dispensary of Mari El Republic, Yoshkar-Ola. <https://orcid.org/0000-0002-0254-092X>

**Ivan A. Egoshin** – Junior Researcher, Scientific Sector, Mari State University, Yoshkar-Ola. <https://orcid.org/0000-0003-0717-0734>

**Alexey A. Kolchev** – Cand. of Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor of the Department of Radio Astronomy, Kazan (Volga region) Federal University of the Ministry of Education and Science of Russian Federation, Kazan. <https://orcid.org/0000-0002-1692-2558>

**Sergey N. Merinov** – radiologist of the department of radiation diagnostics, of the Clinical Oncology Dispensary of Mari El Republic, Yoshkar-Ola. <https://orcid.org/0000-0001-5689-8815>

**Olga V. Busygina** – radiologist of the department of radiation diagnostics, of the Clinical Oncology Dispensary of Mari El Republic, Yoshkar-Ola. <https://orcid.org/0000-0001-7513-2217>



## Модель нейронной сети для выявления и классификации стенозов пояснично-крестцового отдела позвоночника на МР-томограммах

© Русаков А.С.<sup>1</sup>, Тумко В.В.<sup>1</sup>, Сарбаев Р.С.<sup>2</sup>, Успенская Н.А.<sup>1</sup>, Нуднов Н.В.<sup>3</sup>, Кармазановский Г.Г.<sup>4,5</sup>, Коробов А.В.<sup>6</sup>, Титова Л.А.<sup>7</sup>, Скачков А.А.<sup>8</sup>, Кульнева Т.В.<sup>6</sup>, Измалков Д.В.<sup>6</sup>, Андриенко Е.А.<sup>6</sup>, Иванников М.Е.<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup> Remedy Logic; 6 St Johns Ln, New York, NY 10013, США

<sup>2</sup> ООО "Системы поддержки принятия решений"; 428022 Чебоксары, ул. Декабристов, зд.33, Чувашская Республика, Российская Федерация

<sup>3</sup> ФГБУ "Российский научный центр рентгенодиагностики" Минздрава России; 117997 Москва, ул. Профсоюзная, д. 86, Российская Федерация

<sup>4</sup> ФГБУ "Национальный медицинский исследовательский центр хирургии им. А.В. Вишневского" Минздрава России; 117997 Москва, ул. Большая Серпуховская, д. 27, Российская Федерация

<sup>5</sup> ФГАОУ ВО РНИМУ им. Н.И. Пирогова Минздрава России; 117997 Москва, ул. Островитянова, д. 1, Российская Федерация

<sup>6</sup> Автономная некоммерческая организация дополнительного профессионального образования "Институт Эксперт"; 394018 Воронеж, ул. Фридриха Энгельса, д. 58А, Российская Федерация

<sup>7</sup> ФГБОУ ВО "Воронежский государственный медицинский университет имени Н.Н. Бурденко" Минздрава России; 394036 Воронеж, ул. Студенческая, д. 10, Российская Федерация

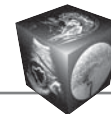
<sup>8</sup> ООО "Объединенное IT пространство"; 398017 Липецк, ул. Metallургов, владение 1, литер А, помещение 18, Российская Федерация

**Цель исследования:** разработать модель свёрточной нейронной сети (convolutional neural network, CNN) для классификации наличия и тяжести стенозов поясничного отдела позвоночника (lumbar spinal stenosis, LSS) в ходе МРТ-исследования и продемонстрировать ее эффективность в качестве точного и последовательного диагностического инструмента.

**Материал и методы.** Морфологические классификации стенозов поясничного отдела позвоночника и количественные измерения ключевых анатомических структур были объединены с помощью разных моделей свёрточных нейронных сетей. Для классификации стенозов модели были обучены на 1635 размеченных исследованиях МР-томограммах поясничного отдела позвоночника. Данные исследования состояли из изображений, взвешенных по T2 в сагиттальной и аксиальной плоскостях на уровне каждого позвонка. Точность модели была оценена с помощью внешнего валидационного набора из 150 МРТ-исследований, оцененных группой из 7 рентгенологов по градации в виде: отсутствия стеноза, незначительной, умеренной или выраженной степени стенозов позвоночного канала. Эталонное значение для всех типов стенозов было определено большинством голосов и в случае разногласий решение выносилось опытным врачом-рентгенологом, не участвовавшим в подсчете голосов. После этого выводы врачей были сопоставлены с выводами обученной модели.

**Результаты.** Модель продемонстрировала сопоставимую производительность со средними показателями рентгенолога как с точки зрения выявления наличия/отсутствия центральных стенозов поясничного отдела позвоночника, так и классификации степени тяжести для всех трех типов стеноза. В случае стеноза центрального канала чувствительность и специфичность свёрточной нейронной сети составили 0,93 и 0,85 для бинарной классификации (наличие/отсутствие) по сравнению со средним показателем рентгенолога (0,86; 0,86). При стенозе латерального кармана чувствительность и специфичность свёрточной нейронной сети составили 0,92 и 0,80 по сравнению со средним показателем рентгенолога 0,83 и 0,94. При foraminal стенозе чувствительность и специфичность свёрточной нейронной сети составили 0,89 и 0,86 по сравнению со средним показателем рентгенолога 0,81 и 0,91. Многоклассовая классификация степени тяжести стенозов показала сходные статистические данные.

**Заключение.** Свёрточная нейронная сеть продемонстрировала сопоставимые со специалистами-рентгенологами результаты в выявлении и классификации центральных стенозов поясничного отдела позвоночника. Интеграция моделей нейронных сетей при обнаружении патологии могла бы обеспечить более высокую точность, эффективность, системность и возможность последующей интерпретации в диагностической практике.



**Ключевые слова:** стеноз поясничного отдела позвоночника; магнитно-резонансная томография; МРТ; искусственный интеллект; нейронная сеть; машинное обучение

**Авторы подтверждают отсутствие конфликтов интересов.**

**Для цитирования:** Русаков А.С., Тумко В.В., Сарбаев Р.С., Успенская Н.А., Нуднов Н.В., Кармазановский Г.Г., Коробов А.В., Титова Л.А., Скачков А.А., Кульнева Т.В., Измалков Д.В., Андриенко Е.А., Иванников М.Е. Модель нейронной сети для выявления и классификации стенозов пояснично-крестцового отдела позвоночника на МР-томограммах. *Медицинская визуализация*. 2025; 29 (1): 102-112. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1436>

Поступила в редакцию: 22.01.2024.

Принята к печати: 19.11.2024.

Опубликована online: 20.01.2025.

# A neural network model for detection and classification of central lumbosacral spinal stenosis on MRI scans

© Andrey S. Rusakov<sup>1</sup>, Vladislav V. Tumko<sup>1</sup>, Ruslan S. Sarbaev<sup>2</sup>,  
Natalia A. Uspenskaya<sup>1</sup>, Nikolay V. Nudnov<sup>3</sup>, Grigory G. Karmazanovsky<sup>4, 5</sup>,  
Andrey V. Korobov<sup>6</sup>, Lilia A. Titova<sup>7</sup>, Artur A. Skachkov<sup>8</sup>, Taisiya V. Kulneva<sup>6</sup>,  
Dmitry V. Izmailkov<sup>6</sup>, Elizaveta A. Andrienko<sup>6</sup>, Mikhail E. Ivannikov<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup> Remedy Logic; 6 St Johns Ln, New York, NY 10013, USA

<sup>2</sup> LLC "Decision Support Systems"; 33, Dekabristov str., Cheboksary 428022, Chuvash Republic, Russian Federation

<sup>3</sup> Russian Scientific Center of Roentgenoradiology of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation; 86, Profsoyusnaya str., Moscow 117997, Russian Federation

<sup>4</sup> 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

<sup>5</sup> Pirogov Russian National Research Medical University; 1, Ostrivtynova str., Moscow 117997, Russian Federation

<sup>6</sup> Autonomous non-profit organization of additional professional education "Expert Institute"; 58A, Friedrich Engels str., Voronezh 394018, Russian Federation

<sup>7</sup> Voronezh State Medical University named after N.N. Burdenko; 10, Studencheskaya str., Voronezh 394036, Russian Federation

<sup>8</sup> LLC "United IT Space"; 1, liter A, 18, Metallurgov str., Lipetsk 398017, Russian Federation

**Objective:** to develop a convolutional neural network (CNN) model to classify the presence and severity of central lumbar spinal stenosis (LSS) during MRI examination and to demonstrate its effectiveness as an accurate and consistent diagnostic tool.

**Methods.** Morphological classifications of LSS and quantitative measurements of key anatomical structures were combined using two CNNs. To classify central stenosis, models were trained on 1635 labeled lumbar spine MRI studies consisting of T2-weighted sagittal and axial planes at the level of each vertebra. The accuracy of the model was assessed using an external validation set of 150 MRI studies graded by a panel of 7 radiologists as: no stenosis, mild, moderate or severe spinal canal stenosis. The reference value for all types of stenosis was determined by majority vote, and in the event of disagreement, a decision was made by an external radiologist. The radiologists' interpretations were then compared with those of the trained model.

**Results.** The model demonstrated comparable performance to the average radiologist both in identifying the presence/absence of LSS and in classifying severity for all 3 types of stenosis. For central canal stenosis, the sensitivity and specificity of the CNN were (0.93; 0.85) for binary classification (presence/absence) compared to the average radiologist (0.86; 0.86). For lateral pocket stenosis, the sensitivity and specificity of CNN were (0.92; 0.80) compared to the radiologist's mean (0.83; 0.94). For foraminal stenosis, the sensitivity and specificity of CNN were (0.89; 0.86) compared to the radiologist's mean (0.81; 0.91). Multiclass classification of stenosis severity showed similar statistics.

**Conclusions.** CNNs showed comparable performance to radiologists in detecting and classifying LSS. The integration of neural network models in pathology detection could provide higher accuracy, efficiency, systematicity, and the possibility of subsequent interpretation in diagnostic practice.

**Keywords:** lumbar spinal stenosis; magnetic resonance imaging; MRI; artificial intelligence; neural network; machine learning

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



**For citation:** Rusakov A.S., Tumko V.V., Sarbaev R.S., Uspenskaya N.A., Nudnov N.V., Karmazanovsky G.G., Korobov A.V., Titova L.A., Skachkov A.A., Kulneva T.V., Izmailkov D.V., Andrienko E.A., Ivannikov M.E. A neural network model for detection and classification of central lumbosacral spinal stenosis on MRI scans. *Medical Visualization*. 2025; 29 (1): 102-112. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1436>

**Received:** 22.01.2024.

**Accepted for publication:** 19.11.2024.

**Published online:** 20.01.2025.

## Введение

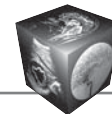
По данным Всемирной организации здравоохранения, боль в спине является основным экономическим бременем, а также одной из основных причин инвалидизации и обращения за медицинской помощью. Распространенной причиной боли являются дегенеративные заболевания позвоночника [1, 2]. Стенозы позвоночного канала являются распространенным дегенеративным заболеванием. Частота выявляемого поясничного стеноза составляет 5 случаев на 1000 обследованных и увеличивается с возрастом: до 40 лет распространенность стеноза составляет 24%, а в возрасте 60–69 лет – более 60% [3]. Клинические симптомы стенозов поясничного отдела позвоночника могут включать боль в пояснице, нижних конечностях и ягодицах, онемение, значительную потерю подвижности и серьезные ограничения активной социальной жизни пациентов [4]. Среди дегенеративных заболеваний позвоночника стенозы представляют собой одну из наиболее распространенных причин хирургического вмешательства на позвоночнике у пациентов старше 65 лет, следовательно, точная и надежная диагностика и последующее лечение имеют важное экономическое и социальное значение. Стенозы поясничного отдела позвоночника характеризуются сужением переднезаднего размера позвоночного канала, сужением латеральных/субартикулярных карманов и фораминальных окон, что, в свою очередь, вызывает сдавливание соответствующих нервных корешков [5].

Стенозы в поясничном отделе позвоночника определяются как клинический синдром и диагностируется как таковой. Диагностическая медицинская визуализация часто используется в качестве подтверждающего метода перед определением тактики лечения. Магнитно-резонансная томография (МРТ) является основным методом детальной анатомической оценки позвоночника с высококачественным дифференцированием мягких тканей и используется для подтверждения диагнозов, основанных на клинических симптомах, и определения оптимального курса лечения. В ряде исследований была предпринята попытка определить основные количественные радиологические кри-

терии для диагностики стенозов поясничного отдела позвоночника [6–8]. Некоторые измерения, такие как площадь поперечного сечения дурального мешка, широко признаны диагностически значимыми, однако окончательная взаимосвязь между проявлением клинических симптомов и конкретными рентгенологическими измерениями остается неясной.

Мнение экспертов-практиков сочетает в себе как качественную оценку морфологических признаков, так и количественные измерения, однако отсутствие единого мнения относительно критериев принятия клинических решений поднимает серьезные вопросы о надежности данной оценки. Следовательно, для повышения точности и достоверности диагностики необходимы методы независимой от врача оценки, сочетающие качественные и количественные характеристики. Модели машинного обучения (ML), включая глубокие свёрточные нейронные сети (CNN), уже успешно применяются для оценки стенозов в поясничном отделе позвоночника и других дегенеративных изменений с высокой точностью в различных подходах [9, 10]. Однако большинство алгоритмов свёрточных нейронных сетей основаны на однокомпонентных моделях и бинарной классификации (присутствует/отсутствует) центрального стеноза поясничного отдела позвоночника. В работе [11] применялась двухкомпонентная свёрточная нейронная сеть для обнаружения стенозов позвоночного канала, латеральных карманов и фораминальных окон с последующей градацией стеноза.

**Цель исследования:** разработка двухэтапной модели с использованием алгоритмов свёрточной нейронной сети, которая сочетает в себе как количественные измерения ключевых анатомических структур, так и качественные морфологические особенности для обнаружения стенозов поясничного отдела позвоночника на аксиальных и сагиттальных МРТ-изображениях. Классификация, выполненная свёрточной нейронной сетью, охватывает выявление всех трех типов стеноза – центрального канала, латеральных карманов и фораминальных окон. Впоследствии производительность модели сравнивали с работой врачей-рентгенологов, чтобы проверить ее надежность и точность.



## Материал и методы

### Набор данных и аннотация

Первоначальный набор данных представлен дата-сетом, собранным авторами, состоящим из 1635 МРТ-исследований, выполненных на МРТ-аппаратах Philips Achieva 1,5 Тл, Philips Intera 1,5 Тл и Siemens Magnetom Symphony 1,5 Тл. В наборе данных находились DICOM-изображения взрослых пациентов (старше 18 лет), направленных на МРТ поясничного отдела позвоночника по поводу болевого синдрома в области поясницы. Пациенты с имплантатами, тяжелым сколиозом и плохим качеством изображения были исключены. Каждое МРТ-исследование проводилось с использованием стандартного протокола исследования поясничного отдела позвоночника, включая T1- и T2-взвешенные сагиттальные изображения без и с режимом жироподавления, а также T2-взвешенные аксиальные импульсные последовательности со сбалансированными метками. В качестве этапа предварительной обработки изучаемые изображения были обрезаны до области поясничных позвонков. Группой врачей-рентгенологов был составлен алгоритм разметки изображений с определением его порядка, количества размеченных анатомических структур и патологических изменений, границ между вариантом нормы и патологией, допустимой точности разметки для каждой анатомической структуры и патологического процесса. На изображениях в сагиттальной плоскости были сегментированы межпозвонковые диски, поясничные и крестцовые позвонки, позвоночный канал, спинной мозг с нервными корешками, задняя продольная связка и остистые отростки. Для аксиальных изображений были размечены мышечная ткань, межпозвонковые диски, позвоночный канал, фораминальные окна, нервные корешки, латеральные карманы, фасеточные суставы, остистый отросток, суставной отросток, желтая связка, протрузии, экструзии дисков, аорта, нижняя полая вена и почки.

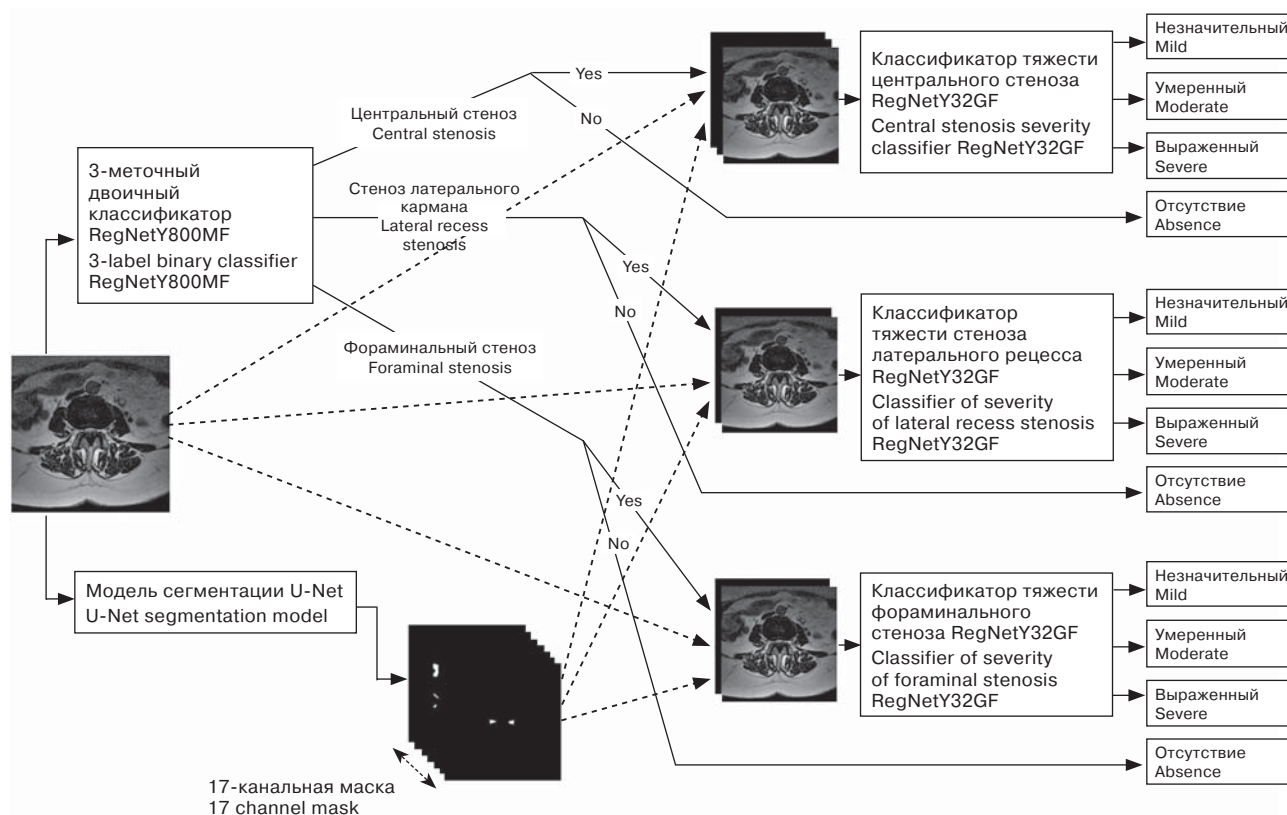
В дополнение к сегментации ключевых анатомических структур врачи-рентгенологи, прошедшие подготовку в области опорно-двигательного аппарата, также оценили исследования по шкале: 0 (отсутствует), 1 (легкая степень), 2 (умеренная), 3 (тяжелая) в зависимости от степени центрального стеноза. Основание для разделения по степеням – измерение соотношения размера деформации дурального мешка относительно его нормальных размеров (классификация Lurie). Эталонный стандарт был определен по правилу голосования большинства и в случае несогласия утвержден другим рентгенологом. В ходе первого обучения модель сегментации выявляла фасеточные суста-

вы и позвоночный канал. Затем изображения были обрезаны по самым латеральным точкам дугоотростчатых суставов, а также по самым краниальным и каудальным точкам позвоночного канала с использованием дополнительных буферов ширины и высоты изображения, которые затем изменялись по размеру и увеличивались (горизонтальные перевороты и вращения). Из 1635 исследований 1390 были использованы для тренировки весов свёрточной нейронной сети, а 245 – в качестве валидационного набора при настройке гиперпараметров.

Кроме того, для окончательной оценки точности модели был использован набор отдельных данных, состоящий из 150 исследований, собранный из тех же источников, что и обучающий набор. Критерии включения/исключения были идентичны критериям набора обучающих данных. Контрольный набор данных для валидации был оценен по шкале отсутствия, легкой, умеренной или тяжелой степени центрального стеноза позвоночного канала группой из 7 радиологов-специалистов. Затем интерпретации рентгенолога были сопоставлены с интерпретацией модели.

### Модель нейронной сети

Чтобы включить как количественные измерения, так и качественные модели формы в комплексную систему диагностики изображений, были созданы две параллельные последовательности из свёрточных нейронных сетей. Первая свёрточная нейронная сеть сегментировала ключевые анатомические объекты и выполняла измерения размера, формы, угла, контраста и площади в обеих (аксиальной и сагиттальной) плоскостях (рис. 1). Архитектура сегментации соответствует модифицированной архитектуре U-Net, которая структурирована из свёрток с повышающей выборкой, затем ректифицированных линейных единиц, свёрток с понижающей выборкой и окончательной карты свёртки [12]. На выходе получается 17 каналов бинарных масок присутствующих объектов – диск, дуральный мешок, нервный корешок, фораминальное окно, позвоночный канал, грыжа, почка, мышца, вена, артерия, фасета, латеральное углубление, остистый отросток, фасеточный сустав, суставной отросток, желтая связка. После сегментации объектов были проведены расчеты пространственных координат для количественных показателей, включая, помимо прочего, выпуклость диска, вентрально-дорсальный диаметр костного позвоночного канала, ширину, высоту и площадь поперечного сечения позвоночного канала и дурального мешка, соотношение диаметра и площади поперечного сечения, асимметрию



**Рис. 1.** Репрезентативные T2-взвешенные МРТ-изображения поясничного отдела позвоночника, демонстрирующие автоматизированный процесс сегментации ключевых анатомических объектов с помощью первой сверхточной нейронной сети в аксиальной плоскости.

**Fig. 1.** Representative T2-weighted MR images of the lumbar spine demonstrating the automated process of segmenting key anatomical landmarks using the first super-accurate neural network in the axial plane.

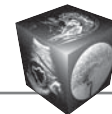
и пространственные размеры грыжи при ее наличии. Эти показатели легли в основу определения наличия и выраженности стеноза центрального канала в одной из частей общей модели.

Для второй модели мы построили последовательность свёрточных нейронных сетей непосредственно в качестве классификаторов. Все модели классификации основаны на архитектурах RegNet, глубоких остаточных сетях с серийным нормированием, идентификационными соединениями и уровнями узких слоев [13]. Первый этап представляет собой бинарный многометочный классификатор для определения наличия/отсутствия стенозов по локализации – центрального, латерального кармана и фораминального окна. Этот классификатор соответствует архитектуре regnet\_y\_800mf. Второй этап состоит из условных классификаторов степени тяжести. Для каждого типа стеноза (центрального, латерального, фораминального) существует один трехклассовый классификатор степени тяжести: легкой, умеренной и тяжелой. Он активен только при условии, что первый классификатор

определяет наличие стеноза. Эти классификаторы следуют архитектуре regnet\_y\_32\_gf. Обучающий набор аксиальных МРТ-изображений для определения степени стеноза был размечен врачами-рентгенологами. Эта модель способна улавливать нюансы морфологических особенностей, указывающих на наличие центрального, латерального и фораминального стенозов. Окончательная модель представляет собой ансамбль моделей сегментации и классификации, так что количественные и качественные характеристики дополняют друг друга для повышения точности прогноза.

### Статистический анализ

Результаты модели и результаты рентгенологов были сопоставлены с эталонным стандартом для выявления и классификации стенозов поясничного отдела позвоночника. Для бинарной классификации были рассчитаны чувствительность, специфичность и площадь под кривой ошибок (AUC-ROC). Для многоклассовой классификации эти показатели рассчитывались в сравнении



с остальными, где средние значения взвешивались по количеству наблюдений.

Межрейтинговое согласие между эталоном, моделью и радиологами оценивалось с помощью каппа-коэффициента Коэна и каппа-коэффициента Флейсса для двух- и множественных соглашений с оценщиками соответственно. Уровень согласия определялся следующим образом:  $<0$  – плохой;  $0,0-0,2$  – незначительный;  $0,21-0,4$  – удовлетворительный;  $0,41-0,6$  – умеренный;  $0,61-0,8$  – значительный;  $0,81-1,0$  – почти идеальный. В многоклассовой среде также была вычислена альфа Кrippендорфа для учета ординарности в оценках тяжести. Все расчеты выполнялись на языке Python (версия 3.7.4) с использованием scikit-learn (версия 1.0.2).

## Результаты исследования

### Бинарная классификация

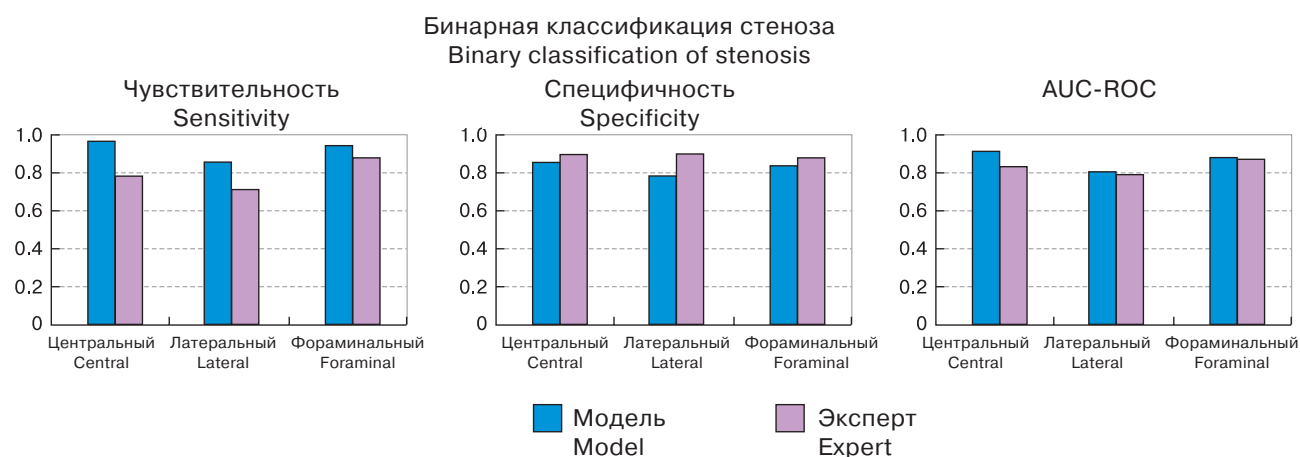
Для сравнения результатов бинарной классификации были объединены оценки 0 и 1 – как отрицательные; 2 и 3 – как положительные. Для оценки каждый тип стеноза рассматривался отдельно. Показатели чувствительности и специфичности приведены на рис. 2.

В случае стеноза центрального канала средние значения чувствительности, специфичности и AUC-ROC для рентгенологов составили 0,86; 0,866; 0,82 соответственно, в то время как показатели для модели были 0,90; 0,88; 0,89. 95% доверительные интервалы (ДИ) для показателей чувствительности и специфичности были следующими: 0,837; 0,944 и 0,866; 0,884 соответственно. Таким образом, модель продемонстрировала сопоста-

вимую производительность по сравнению со среднестатистическим врачом-рентгенологом, участвовавшим в исследовании. Для бинарного взаиморасчетного согласия средний показатель каппа Коэна был значительным между радиологами и эталонным стандартом со значением – 0,72. Среднее значение для модели свёрточных нейронных сетей составило – 0,77. Коэффициент множественной оценки каппа Флейсса среди оценщиков составил – 0,65 по сравнению с 0,76 между моделью и эталонным стандартом.

Для стеноза латерального кармана средние значения чувствительности, специфичности и AUC-ROC для рентгенологов составили 0,83; 0,94; 0,76 соответственно, в то время как показатели для модели были 0,92; 0,80; 0,87. 95% ДИ для показателей чувствительности и специфичности были следующими: 0,865; 0,954 и 0,790; 0,812. Для бинарной оценки среднее значение коэффициента каппы Коэна соотносилось между рентгенологами и эталонным стандартом со значением – 0,37. Среднее значение модели свёрточных нейронных сетей составило – 0,21.

Для фораминального стеноза средние значения чувствительности, специфичности и AUC-ROC для рентгенологов составили 0,81; 0,91; 0,89 соответственно, в то время как показатели для модели составили 0,89; 0,86; 0,87. 95% ДИ для показателей чувствительности и специфичности были следующими: 0,871; 0,916 и 0,847; 0,868 соответственно. Для бинарной оценки средний показатель каппа Коэна был значительным между радиологами и эталонным стандартом со значением – 0,63. Среднее значение для модели составило 0,54.



**Рис. 2.** Сравнение чувствительности, специфичности и AUC-ROC группы рентгенологов и модели классификации наличия/отсутствия стеноза поясничного отдела позвоночника.

**Fig. 2.** Comparison of sensitivity, specificity, and AUC-ROC of the radiologist group and the model for classifying the presence/absence of lumbar spinal stenosis.



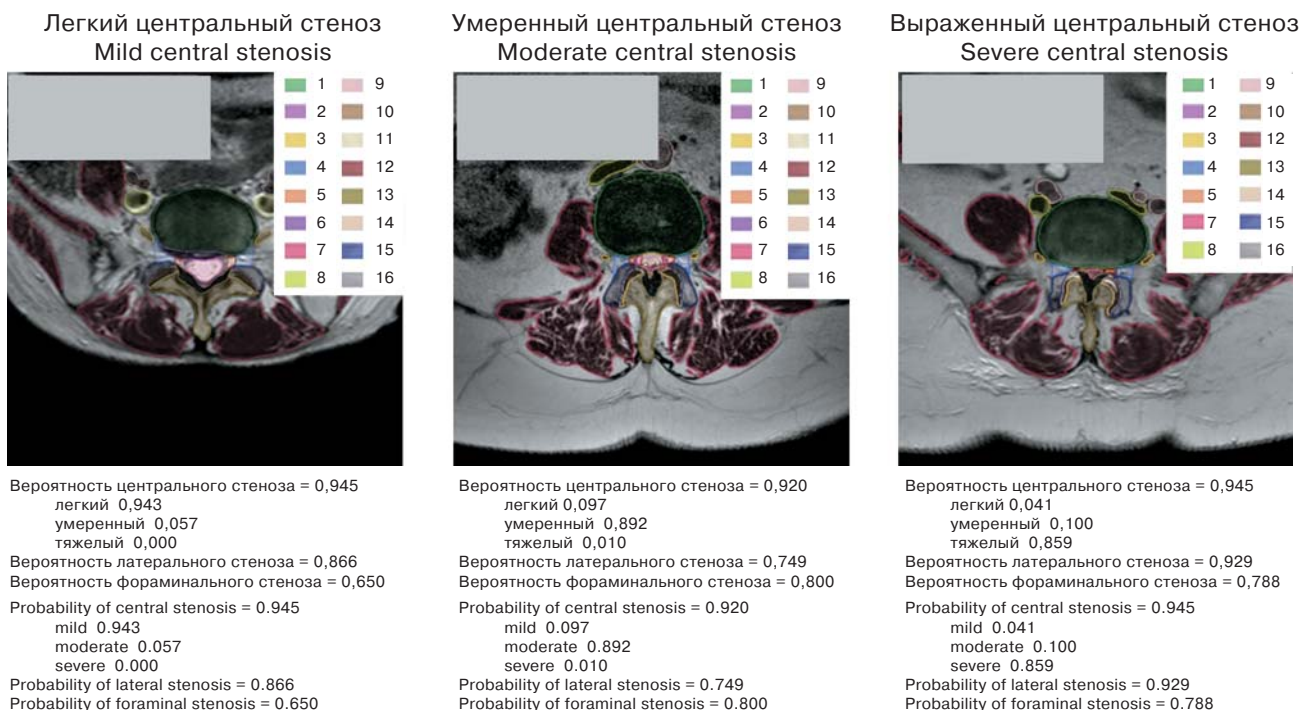
### Мультиклассовая классификация

Проводилось также сравнение показателей по полной шкале оценки центрального стеноза поясничного отдела позвоночника: отсутствие, легкая, среднетяжелая и тяжелая степень (рис. 3). Показатели эффективности для классификации по степени тяжести приведены на рис. 4.

Чтобы учесть классовый дисбаланс, показатели были рассчитаны с помощью весовых коэффициентов наблюдений. Для центрального стеноза средние показатели чувствительности, специфичности и AUC-ROC для рентгенологов составили 0,77; 0,86; 0,86 соответственно, тогда как для CNN эти показатели были 0,88; 0,90; 0,89. 95% ДИ для показателей чувствительности и специфичности были следующими: 0,866; 0,884 и 0,837; 0,944 соответственно. Среднее значение коэффициента Коэна между радиологами и эталонным стандартом составило 0,62 и 0,68 между моделью и эталонным стандартом. Порядковый показатель альфа Кrippендорфа составил 0,70 у рентгенологов и 0,80 у модели и эталонного стандарта.

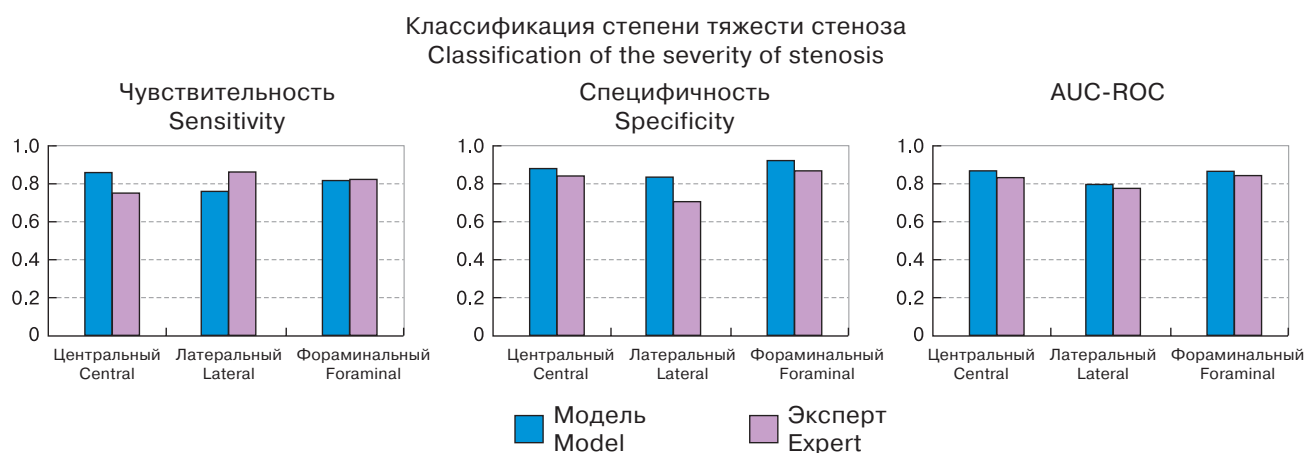
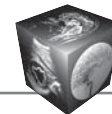
При стенозе латерального углубления средние показатели чувствительности, специфичности и AUC-ROC для рентгенологов составили 0,93; 0,59; 0,76 соответственно, тогда как для модели эти показатели были 0,80; 0,92; 0,87. 95% ДИ для показателей чувствительности и специфичности были следующими: 0,790; 0,812 и 0,865; 0,954 соответственно. Для взаимного согласования среднее значение коэффициента Коэна между радиологами и эталонным стандартом составило 0,32 и 0,19 между моделью и эталонным стандартом.

Для фораминального стеноза средняя чувствительность и специфичность для рентгенологов составили 0,87; 0,89; 0,89 соответственно, тогда как для CNN эти показатели были 0,86; 0,90; 0,87. 95% ДИ для показателей чувствительности и специфичности были следующими: 0,847; 0,868 и 0,871; 0,916 соответственно. Для взаимного согласования среднее значение коэффициента Коэна между радиологами и эталонным стандартом составило 0,56 и 0,48 между моделью и эталонным стандартом.



**Рис. 3.** Репрезентативные аксиальные T2-взвешенные МР-томограммы поясничного отдела позвоночника пациентов, которые были классифицированы нейронной сетью как легкий, умеренный и выраженный центральный стеноз. 1 – диск; 2 – дуральный мешок; 3 – нерв; 4 – нервные отверстия; 5 – спинной канал; 6 – грыжа; 7 – мышцы; 8 – вена; 9 – артерия; 10 – позвоночная дуга; 11 – нервные корни; 12 – боковая выемка; 13 – остистый отросток; 14 – фасеточные суставы; 15 – суставной процесс; 16 – желтая связка.

**Fig. 3.** Representative axial T2-weighted MRIs of the lumbar spine of patients classified by the neural network as having mild, moderate, and severe central stenosis. 1 – disc; 2 – dural sac; 3 – nerve; 4 – foraminal windows; 5 – spinal canal; 6 – hernia; 7 – muscles; 8 – vein; 9 – artery; 10 – vertebral arch; 11 – nerve roots; 12 – lateral pocket; 13 – spinous process; 14 – facet joints; 15 – articular process; 16 – ligamentum flavum.



**Рис. 4.** Сравнение чувствительности, специфичности и AUC-ROC группы рентгенологов и модели для классификации тяжести стеноза поясничного отдела позвоночника.

**Fig. 4.** Comparison of sensitivity, specificity, and AUC-ROC of the radiology group and the lumbar spinal stenosis severity classification model.

В очередной раз модель продемонстрировала сопоставимую точность по сравнению со средне-статистическим специалистом-рентгенологом на контрольной панели при всех типах стеноза.

## Обсуждение

Стеноз поясничного отдела позвоночника (LSS) – одна из самых распространенных патологий при визуализации и одно из наиболее частых показаний к операции на позвоночнике [14]. МРТ поясничного отдела позвоночника имеет важное значение для оценки стеноза поясничного отдела позвоночника и для подтверждения клинических данных, в значительной степени заменяя исследования КТ-миелографии из-за ее высокой контрастности мягких тканей. Тем не менее интерпретация МР-томограмм поясничного отдела позвоночника занимает много времени и зависит от знаний и опыта отдельного рентгенолога, поэтому желательна поддержка объективных и стандартизированных методов диагностики и принятия решений.

Целью данного исследования стала разработка модели из свёрточных нейронных сетей для классификации наличия и тяжести стеноза центрального канала с демонстрацией его эффективности в качестве точного и последовательного диагностического инструмента. Нами разработана ансамблевая модель свёрточных нейронных сетей, которая объединила количественные показатели сегментированных анатомических структур и морфологические особенности для прямой оценки стеноза позвоночного канала. Оценка по внешнему набору данных продемонстрировала аналогич-

ные результаты в сравнении с группой из 7 врачей-рентгенологов по выявлению и классификации тяжести стеноза позвоночного канала. Например, для бинарной диагностики стеноза центрального канала точность модели была выше по сравнению со средним показателем рентгенолога, достигая значений чувствительности, специфичности и AUC-ROC 0,88; 0,89; 0,89 по сравнению со средним показателем рентгенолога 0,86; 0,866; 0,82 соответственно. Для многоклассовой степени тяжести модель продемонстрировала результаты 0,81; 0,90; 0,85 по сравнению со средним показателем рентгенолога 0,77; 0,86; 0,86. По результатам внешней проверки соответствие между эталонным стандартом и рентгенологами было существенным для бинарной классификации (0,65) и многоклассовой классификации (0,62). Межэкспертное согласие между эталонным стандартом и моделью было несколько выше как для бинарной классификации (0,76), так и для многоклассовой классификации (0,68) по сравнению с данными рентгенологов.

Предыдущие исследования рассматривали эффективность различных моделей машинного обучения при обнаружении и классификации стенозов на МР-томограммах поясничного отдела позвоночника. В большинстве исследований для оценки эффективности моделей использовались два эксперта, в то время как при нашем подходе экспертная группа состояла из 7–8 радиологов. J.T.P.D. Hallinan и соавт. разработали двухэтапную модель глубокого обучения, используя первую модель для размещения интересующей области в центральном канале, латеральных карманах и фо-



раминальных окнах с последующей оценкой по второй модели [11]. В отличие от наших результатов для классификации центрального канала, их модель показала более высокие межклассовые соответствия, но лучшая точность фиксировалась у рентгенологов как для бинарной (0,98), так и для многоклассовой (0,89) классификации по сравнению с моделью глубокого обучения. На более крупном наборе данных из 7108 МР-томограмм поясничного отдела позвоночника на аксиальных и сагиттальных срезах J.T. Lu и соавт. разработали архитектуру U-Net, основанную на слабоконтролируемых метках обработки естественного языка, полученных из отчетов радиологов. Точность оценки потери по нескольким классам (нормальная–легкая–среднетяжелая–тяжелая) достигла в среднем 70,6% [15]. В другой работе двухэтапная свёрточная нейронная сеть была обучена локализовать дуральный мешок при аксиальном T2-взвешенном МРТ-исследовании в одном двигательном сегменте ( $L_{IV-V}$ ) с вторичной оценкой локализованной области [16]. Согласованность оценок между двумя экспертными метками составила 77,5%, в то время как модель достигла точности 77,9–83,0% по сравнению с экспертными метками. Относительно недавно Z.H. Su и соавт. создали многозадачную классификационную сеть на основе большого набора данных аксиальной МРТ поясничного отдела позвоночника с T2-взвешиванием для оценки грыжи межпозвонкового диска, фораминального стеноза и стеноза позвоночного канала, которая была оценена двумя клиницистами в качестве эталонного стандарта [17]. Точность моделей варьировала от 79,7 до 87,0% для внешнего и внутреннего набора данных соответственно.

Несмотря на то что рентгенологическая оценка степени поясничного стеноза является основной частью диагностики и составления тактики лечения в клинической практике, она не всегда может коррелировать с тяжестью боли или функциональными нарушениями у некоторых пациентов [18]. Следовательно, модели нейронных сетей могут также включать клинические симптомы в дополнение к данным визуализации. Недавно была предложена гибридная модель свёрточной нейронной сети, сочетающая в себе возможности как клинической, так и визуализационной диагностики, для определения кандидатуры на хирургическое вмешательство у пациентов со стенозами поясничного отдела позвоночника [19]. В этом исследовании гибридная модель продемонстрировала высокую точность прогнозирования кандидатов на оперативное вмешательство с коэффициентом AUC-ROC 0,93 в сравнении с 0,84 по индивидуальной

рекомендации врача. Однако если гибридные модели, сочетающие в себе признаки как клинических факторов, так и данных визуализации, превосходят те, которые сочетают признаки, основанные исключительно на данных визуализации, то это должно быть подтверждено в будущих исследованиях.

Наше исследование имеет ограничения, большая часть которых является теоретическими и связанными с характером данного проекта – отсутствием “золотого стандарта” для сравнительного анализа текущей модели, то есть отсутствие твердо установленного консенсуса в отношении определений шкалы оценки МР-томограмм. В данном исследовании эталонные значения для каждого случая были установлены с помощью обобщенной радиологической оценки. Трудоемкий процесс ручного описания ограничивает количество МРТ-исследований, которые можно было бы использовать для обучения модели нейронной сети. Кроме того, в некоторых случаях не было достигнуто консенсуса между экспертами в отношении отдельных нюансов разметки. Заслуживает внимания функционал искусственного интеллекта, который будет учитывать аспекты как анализа изображений, так и клинических заключений, например, одновременный анализ дегенеративных изменений, деформации позвоночника и клинических симптомов. Однако разработка таких алгоритмов выходила за рамки данного исследования и будет изучаться в дальнейшем.

## Заключение

Таким образом мы продемонстрировали, что интеграция моделей свёрточных нейронных сетей способна диагностировать и оценивать стенозы на МР-томограммах поясничного отдела позвоночника с высокой точностью, надежностью и возможностью интерпретации post-hoc (найти закономерности после завершения исследования и обнаружить результаты, которые не были основной целью), сравнимой с результатами опытных рентгенологов, и может функционировать в качестве вспомогательного диагностического инструмента. В будущих работах модель свёрточных нейронных сетей должна быть развита для оценки более широкого спектра дегенеративных изменений, которые коррелируют с наличием у пациентов стенозов в поясничном отделе позвоночника.

## Участие авторов

Русаков А.С. – концепция и дизайн исследования.

Тумко В.В. – проведение исследования.

Сарбаев Р.С. – анализ и интерпретация полученных данных.



Успенская Н.А. – статистическая обработка данных.  
Нуднов Н.В. – утверждение окончательного варианта статьи.

Кармазановский Г.Г. – утверждение окончательного варианта статьи.

Коробов А.В. – подготовка, создание опубликованной работы.

Титова Л.А. – подготовка и редактирование текста.

Скачков А.А. – сбор и обработка данных.

Кульнева Т.В. – обзор публикаций по теме статьи.

Измалков Д.В. – написание текста.

Андрienко Е.А. – ответственность за целостность всех частей статьи.

Иванников М.Е. – участие в научном дизайне.

### Authors' participation

Rusakov A.S. – concept and design of the study.

Tumko V.V. – conducting research.

Sarbaev R.S. – analysis and interpretation of the obtained data.

Uspenskaya N.A. – statistical analysis.

Nudnov N.V. – approval of the final version of the article.

Karmazanovsky G.G. – approval of the final version of the article.

Korobov A.V. – preparation and creation of the published work.

Titova L.A. – text preparation and editing.

Skachkov A.A. – collection and analysis of data.

Kulneva T.V. – review of publications.

Izmalkov D.V. – writing text.

Andrienko E.A. – responsibility for the integrity of all parts of the article.

Ivannikov M.E. – participation in scientific design.

### Список литературы [References]

- Kalichman L., Cole R., Kim D.H. et al. Spinal stenosis prevalence and association with symptoms: the Framingham Study. *Spine J.* 2009; 9 (7): 545–550. <https://doi.org/10.1016/j.spinee.2009.03.005>
- Wu A.M., Zou F., Cao Y. et al. Lumbar spinal stenosis: an update on the epidemiology, diagnosis and treatment. *Am. Med. J.* 2017; 2 (5): 63–63. <https://doi.org/10.21037/amj.2017.04.13>
- Katz J.N., Harris M.B. Lumbar Spinal Stenosis. *New Engl. J. Med.* 2008; 358 (8): 818–825. <https://doi.org/10.1056/nejmcp0708097>
- Lurie J., Tomkins-Lane C. Management of lumbar spinal stenosis. *BMJ.* 2016; 352: h6234. <https://doi.org/10.1136/bmj.h6234>
- Kreiner D.S., Shaffer W.O., Baisden J.L. et al. An evidence-based clinical guideline for the diagnosis and treatment of degenerative lumbar spinal stenosis (update). *Spine J.* 2013; 13 (7): 734–743. <https://doi.org/10.1016/j.spinee.2012.11.059>
- Majidi H., Shafizad M., Niksolt F. et al. Relationship Between Magnetic Resonance Imaging Findings and Clinical Symptoms in Patients with Suspected Lumbar Spinal Canal Stenosis: a Case-control Study. *Acta Informatica Medica.* 2019; 27 (4): 229–233. <https://doi.org/10.5455/aim.2019.27.229-233>
- Steurer J., Roner S., Gnannt R. et al. Quantitative radiologic criteria for the diagnosis of lumbar spinal stenosis: a systematic literature review. *BMC Musculoskelet. Disord.* 2011; 12 (1): 175. <https://doi.org/10.1186/1471-2474-12-175>
- Andreisek G., Deyo R.A., Jarvik J.G. et al. Consensus conference on core radiological parameters to describe lumbar stenosis – an initiative for structured reporting. *Eur. Radiol.* 2014; 24 (12): 3224–3232. <https://doi.org/10.1007/s00330-014-3346-z>
- Lehnen N.C., Haase R., Faber J. et al. Detection of Degenerative Changes on MR Images of the Lumbar Spine with a Convolutional Neural Network: A Feasibility Study. *Diagnostics.* 2021; 11 (5): 902. <https://doi.org/10.3390/diagnostics11050902>
- Jamaludin A., Kadir T., Zisserman A. SpineNet: Automated classification and evidence visualization in spinal MRIs. *Med. Image Anal.* 2017; 41: 63–73. <https://doi.org/10.1016/j.media.2017.07.002>
- Hallinan J.T.P.D., Zhu L., Yang K. et al. Deep Learning Model for Automated Detection and Classification of Central Canal, Lateral Recess, and Neural Foraminal Stenosis at Lumbar Spine MRI. *Radiology.* 2021; 300 (1): 130–138. <https://doi.org/10.1148/radiol.2021204289>
- Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. In: Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention–MICCAI 2015: 18th International Conference, Munich, Germany, October 5–9, 2015, Proceedings, Part III 18 (p. 234–241). Springer International Publishing.
- Radosavovic I., Kosaraju R.P., Girshick R. et al. Designing network design spaces. In: Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. 2020: 10428–10436.
- Pannell W.C., Savin D.D., Scott T.P. et al. Trends in the surgical treatment of lumbar spine disease in the United States. *Spine J.* 2015; 15 (8): 1719–1727. <https://doi.org/10.1016/j.spinee.2013.10.014>
- Lu J.T., Pedemonte S., Bizzo B. et al. DeepSPINE: Automated Lumbar Vertebral Segmentation, Disc-level Designation, and Spinal Stenosis Grading Using Deep Learning. Arxiv. Published online 2018. <https://doi.org/10.48550/arxiv.1807.10215>
- Won D., Lee H.J., Lee S.J., Park S.H. Spinal Stenosis Grading in Magnetic Resonance Imaging Using Deep Convolutional Neural Networks. *Spine.* 2020; 45 (12): 804–812. <https://doi.org/10.1097/brs.00000000000003377>
- Su Z.H., Liu J., Yang M.S. et al. Automatic Grading of Disc Herniation, Central Canal Stenosis and Nerve Roots Compression in Lumbar Magnetic Resonance Image Diagnosis. *Front. Endocrinol.* 2022; 13: 890371. <https://doi.org/10.3389/fendo.2022.890371>
- Andrasinova T., Adamova B., Buskova J. et al. Is there a Correlation Between Degree of Radiologic Lumbar Spinal Stenosis and its Clinical Manifestation? *Clin. Spine Surg.* 2018; 31 (8): E403–E408. <https://doi.org/10.1097/bsd.00000000000000681>
- Mourad R., Kolisnyk S., Baiun Y. et al. Performance of hybrid artificial intelligence in determining candidacy for lumbar stenosis surgery. *Eur. Spine J.* 2022; 31 (8): 2149–2155. <https://doi.org/10.1007/s00586-022-07307-7>



**Для корреспонденции\*:** Иванников Михаил Евгеньевич – e-mail: ivannikovmichail@gmail.com

**Русаков Андрей Сергеевич** – основатель и главный исполнительный директор Remedy Logic, New York.

**Тумко Владислав Владимирович** – главный операционный директор Remedy Logic, New York.

**Сарбаев Руслан Сергеевич** – генеральный директор ООО “Системы поддержки принятий решений”, Чебоксары.

**Успенская Наталья Александровна** – руководитель команды компьютерного зрения Remedy Logic, New York.

**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 рентгено-радиологии” Минздрава России, Москва. <https://orcid.org/0000-0001-5994-0468>

**Кармазановский Григорий Григорьевич** – академик РАН, доктор мед. наук, профессор, заведующий отделом лучевых методов диагностики ФГБУ “НМИЦ хирургии им. А.В. Вишневского” Минздрава России; профессор кафедры лучевой диагностики и терапии медико-биологического факультета ФГБОУ ВО РНИМУ им. Н.И. Пирогова Минздрава России, Москва. <https://orcid.org/0000-0002-9357-0998>

**Коробов Андрей Владимирович** – директор АНО ДПО “Институт Эксперт”, Воронеж.

**Титова Лилия Александровна** – доктор мед. наук, доцент, заведующая кафедрой инструментальной диагностики, ФГБОУ ВО “ВГМУ им Н.Н. Бурденко” Минздрава России, Воронеж. <https://orcid.org/0000-0002-8421-3411>

**Скачков Артур Андреевич** – специалист по машинному обучению ООО “Объединенное IT пространство”, Липецк. <https://orcid.org/0009-0002-6072-8143>

**Кульнева Таисия Владимировна** – заместитель директора по экспертной работе в области медицинской визуализации АНО ДПО “Институт Эксперт”, Воронеж.

**Измалков Дмитрий Витальевич** – заведующий кафедрой лучевой диагностики АНО ДПО “Институт Эксперт”, Воронеж.

**Андрienко Елизавета Андреевна** – специалист общего отдела АНО ДПО “Институт Эксперт”, Воронеж.

**Иванников Михаил Евгеньевич** – ординатор по специальности “рентгенология” ФГБУ “Российский научный центр рентгено-радиологии” Минздрава России, Москва. <https://orcid.org/0009-0007-0407-0953>

**Contact\*:** Mikhail E. Ivannikov – e-mail: ivannikovmichail@gmail.com

**Andrey S. Rusakov** – Founder and CEO of Remedy Logic, New York.

**Vladislav V. Tumko** – Chief Operating Officer of Remedy Logic, New York.

**Ruslan S. Sarbaev** – General Director of Decision Support Systems LLC, Cheboksary.

**Natalia A. Uspenskaya** – Computer Vision Team Leader at Remedy Logic, New York.

**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, Moscow. <https://orcid.org/0000-0001-5994-0468>

**Grigory G. Karmazanovsky** – Russian Academy of Sciences (RAS) Full Member, Doct. of Sci. (Med.), Professor, Head of the Diagnostic Radiology Department at the A.V. Vishnevsky National Medical Research Center of Surgery; Professor of radiology department, Pirogov Russian national research medical university, Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-9357-0998>

**Andrey V. Korobov** – Director of Autonomous non-profit organization of additional professional education “Expert Institute”, Voronezh.

**Lilia A. Titova** – Doct. of Sci. (Med.), Head of the Department of Instrumental Diagnostics, Voronezh State Medical University named after N.N. Burdenko, Voronezh. <https://orcid.org/0000-0002-8421-3411>

**Artur A. Skachkov** – machine learning expert of LLC “United IT Space”, Lipetsk. <https://orcid.org/0009-0002-6072-8143>

**Taisiya V. Kulneva** – Deputy Director for Expertise in Medical Imaging of Autonomous non-profit organization of additional professional education “Expert Institute”, Voronezh.

**Dmitry V. Izmalkov** – Head of the Department of Radiologic Diagnostics of Autonomous non-profit organization of additional professional education “Expert Institute”, Voronezh.

**Elizaveta A. Andrienko** – general specialist of Autonomous non-profit organization of additional professional education “Expert Institute”, Voronezh.

**Mikhail E. Ivannikov** – resident in the specialty of “radiology”, Russian Scientific Center of Roentgenoradiology of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Moscow. <https://orcid.org/0009-0007-0407-0953>