

ISSN 2079-5343

Научно-практический рецензируемый журнал **ЛУЧЕВАЯ ДИАГНОСТИКА И ТЕРАПИЯ**

Магнитно-резонансная томография, ультразвуковая диагностика, рентгенология, компьютерная томография,
ядерная медицина, лучевая терапия

МРТ

Современные
подходы
к стратификации
цирроза печени

ИИ

BI-RADS:
диагностическая
точность
и согласование
сервисов

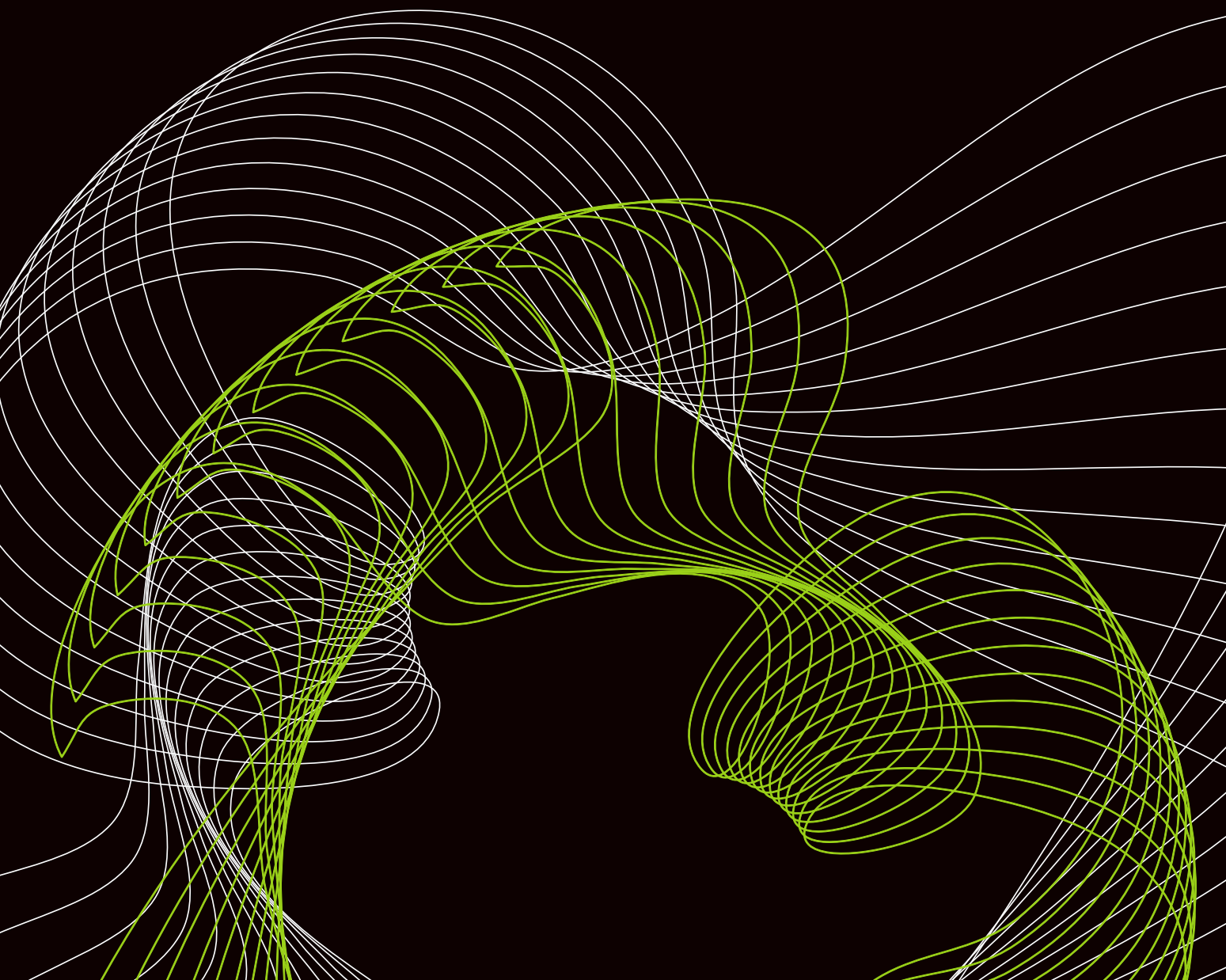
УЗИ

Мультипараметрическое
исследование носовой
перегородки

№

2026 г.

2
(17)



Научно-практический рецензируемый журнал

ЛУЧЕВАЯ ДИАГНОСТИКА И ТЕРАПИЯ

Магнитно-резонансная томография, ультразвуковая диагностика, рентгенология, компьютерная томография, ядерная медицина, лучевая терапия

Учредители: Санкт-Петербургское радиологическое общество,
Санкт-Петербург, РоссияИнститут мозга человека им. Н. П. Бехтеревой РАН,
Санкт-Петербург, РоссияБалтийский медицинский образовательный центр,
Санкт-Петербург, Россия№ 2⁽¹⁷⁾
2026**Главный редактор***Трофимова Татьяна Николаевна*доктор медицинских наук, профессор, член-корреспондент РАН, заслуженный врач РФ
Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова,
Институт мозга человека им. Н. П. Бехтеревой РАН, Санкт-Петербург, Россия**Заместители главного редактора***Борсуков Алексей Васильевич*доктор медицинских наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ
Смоленский государственный медицинский университет, Смоленск, Россия*Рыжкова Дарья Викторовна*доктор медицинских наук, профессор РАН,
Национальный медицинский исследовательский центр им. В. А. Алмазова, Санкт-Петербург, Россия**Ответственный секретарь***Железняк Игорь Сергеевич*доктор медицинских наук, профессор,
Военно-медицинская академия им. С. М. Кирова, Санкт-Петербург, Россия

Журнал включен в перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук: 3.1.6 — Онкология, лучевая терапия (медицинские науки); 3.1.18 — Внутренние болезни (медицинские науки); 3.1.20 — Кардиология (медицинские науки); 3.3.3 — Патологическая физиология (медицинские науки); 3.1.10 — Нейрохирургия (медицинские науки); 3.1.25 — Лучевая диагностика (медицинские науки)

Журнал включен в Реферативный журнал и базы данных ВИНТИ, базы данных Global Health, Google Scholar, в Российский индекс научного цитирования www.elibrary.ru

Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, Номер свидетельства: ПИ № ФС77-73712 от 05 октября 2018 г.

Издатель: ООО «Балтийский медицинский образовательный центр»**Адрес редакции и издателя:** 194295, г. Санкт-Петербург, б-р Поэтический,
д. 2, литера А, помещ. 1-Н, офис 660, тел.: +7 921 956-92-55<http://radiag.bmoc-spb.ru/jour>e-mail: ooo.bmoc@mail.ru**ПОДПИСНОЙ ИНДЕКС:****«Урал Пресс»
(Пресса России) 014023**

Редколлегия журнала

<i>Багненко Сергей Фёдорович</i>	— доктор медицинских наук, профессор, академик РАН, Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова, Санкт-Петербург, Россия
<i>Багненко Сергей Сергеевич</i>	— доктор медицинских наук, профессор, Национальный медицинский исследовательский центр онкологии им. Н. Н. Петрова, Санкт-Петербург, Россия
<i>Беликова Мария Яковлевна</i>	— доктор медицинских наук, Мой медицинский центр Высокие технологии, Санкт-Петербург, Россия
<i>Беляков Николай Алексеевич</i>	— доктор медицинских наук, профессор, академик РАН, заслуженный деятель науки РФ, Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова, Санкт-Петербург, Россия
<i>Важенин Андрей Владимирович</i>	— доктор медицинских наук, профессор, академик РАН, Южно-Уральский государственный медицинский университет, Челябинск, Россия
<i>Вебер Виктор Робертович</i>	— доктор медицинских наук, профессор, академик РАН, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, Великий Новгород, Россия
<i>Долгушин Борис Иванович</i>	— доктор медицинских наук, профессор, академик РАН, Национальный медицинский исследовательский центр онкологии им. Н. Н. Блохина, Москва, Россия
<i>Завадовская Вера Дмитриевна</i>	— доктор медицинских наук, профессор, Национальный медицинский исследовательский центр нейрохирургии им. акад. Н. Н. Бурденко, Москва, Россия
<i>Захарова Наталья Евгеньевна</i>	— доктор медицинских наук, профессор, Российский научный центр рентгенорадиологии, Москва, Россия
<i>Зяблова Елена Игоревна</i>	— доктор медицинских наук, доцент, Научно-исследовательский институт — Краевая клиническая больница №1 им. проф. С. В. Очаповского, Краснодар, Россия
<i>Коростышевская Александра Михайловна</i>	— доктор медицинских наук, ветеран труда СО РАН, Международный томографический центр, Новосибирск, Россия
<i>Лукина Ольга Васильевна</i>	— доктор медицинских наук, доцент, Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова, Санкт-Петербург, Россия
<i>Пронин Игорь Николаевич</i>	— доктор медицинских наук, профессор, академик РАН, Национальный медицинский исследовательский центр нейрохирургии им. акад. Н. Н. Бурденко, Москва, Россия
<i>Рахимжанова Раушан Ибжановна</i>	— доктор медицинских наук, профессор, заслуженный деятель РК, академик Академии профилактической медицины, Медицинский университет Астана, Нур-Султан, Казахстан
<i>Риенмюллер Райнер</i>	— доктор медицинских наук, профессор, г. Грац, Австрия
<i>Риццо Стефания</i>	— доктор медицинских наук, Клиника радиологии, Лугано, Швейцария
<i>Синельникова Елена Владимировна</i>	— доктор медицинских наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Санкт-Петербург, Россия
<i>Станжевский Андрей Алексеевич</i>	— доктор медицинских наук, Российский научный центр радиологии и хирургических технологий им. акад. А. М. Гранова, Санкт-Петербург, Россия
<i>Сухова Марина Борисовна</i>	— доктор медицинских наук, доцент, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия
<i>Труфанов Геннадий Евгеньевич</i>	— доктор медицинских наук, профессор, Национальный медицинский исследовательский центр им. В. А. Алмазова, Санкт-Петербург, Россия
<i>Тулупов Андрей Александрович</i>	— доктор медицинских наук, профессор РАН, член-корреспондент РАН, Международный томографический центр СО РАН, Новосибирск, Россия
<i>Усов Владимир Юрьевич</i>	— доктор медицинских наук, профессор, Национальный медицинский исследовательский центр имени академика Е. Н. Мешалкина, Новосибирск, Россия
<i>Филиппо Дель Гранде</i>	— доктор медицинских наук, профессор, Клиника радиологии, Лугано, Швейцария
<i>Чибисова Марина Анатольевна</i>	— доктор медицинских наук, профессор, Северо-Западный государственный медицинский университет им. И. И. Мечникова, Санкт-Петербург, Россия

scientific peer-reviewed journal

DIAGNOSTIC RADIOLOGY AND RADIOTHERAPY

Magnetic resonance imaging, diagnostic ultrasound, roentgenology, computed tomography, nuclear medicine, radiotherapy

Founders: St. Petersburg Society of Radiology, St. Petersburg, Russia

N. P. Bechtereva Institute of the Human

Brain of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

Baltic Medical Educational Center, St. Petersburg, Russia

No. **2**⁽¹⁷⁾
2026

Editor-in-chief

Trofimova, Tatyana Nikolaevna

Dr. of Sci. (Med.), Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences,
Pavlov First State Medical University of St. Petersburg,

N. P. Bechtereva the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

Associates Editor

Borsukov, Alexey Vasilyevich

Dr. of Sci. (Med.), Professor, Honored Scientist of the Russian Federation
Smolensk State Medical University, Smolensk, Russia

Ryzhkova, Daria Victorovna

Dr. of Sci. (Med.), Professor of the Russian Academy of Sciences,
The National Medical Research Centre of V. A. Almazov, St. Petersburg, Russia

Executive Secretary

Zheleznyak, Igor Sergeevich

Dr. of Sci. (Med.), Professor,
S. M. Kirov Military Medical Academy, St. Petersburg, Russia

The journal is included in the List of reviewed scientific journals of higher attestation Commission for publication
of basic scientific results of theses database of the Russian Science Citation Index (RSCI), Global Health, Google Scholar,
abstract journal and database VINITI

Publisher: Baltic Medical Educational Center

Mailing address of the journal: 194295, b-r Poeticheskyy, 2, lit. A,
room. 1st, office 660, St. Petersburg, Russia, tel.: +7 921 956-92-55
<http://radiag.bmoc-spb.ru/jour>
e-mail: ooo.bmoc@mail.ru

Union Catalogue

«Ural Press»

(The Russian Press) **014023**

Editorial Board

- Sergey F. Bagnenko* — Dr. of Sci. (Med.), Professor, Full Member of the Russian Academy of Science, Pavlov First Saint Petersburg State Medical University, St. Petersburg, Russia
- Sergey S. Bagnenko* — Dr. of Sci. (Med.), Professor, the National Medical Research Centre of Oncology of N. N. Petrov, St. Petersburg, Russia
- Mariya Ya. Belikova* — Dr. of Sci. (Med.), My Medical Center High Technologies, St. Petersburg, Russia
- Nikolay A. Belyakov* — Dr. of Sci. (Med.), Professor, Full Member of the Russian Academy of Science, Honored Worker of Science, Pavlov First Saint Petersburg State Medical University, St. Petersburg, Russia
- Andrey V. Vazhenin* — Dr. of Sci. (Med.), Professor, Full Member of the Russian Academy of Science, South-Ural State Medical University, Chelyabinsk, Russia
- Victor R. Veber* — Dr. of Sci. (Med.), Professor, Full Member of the Russian Academy of Sciences, The Novgorod State University of Yaroslav Mudriy, V. Novgorod, Russia
- Boris I. Dolgushin* — Dr. of Sci. (Med.), Professor, Full Member of the Russian Academy of Sciences, the National Medical Research Centre of Oncology of N. N. Blokhin, Moscow, Russia
- Vera D. Zavadovskaya* — Dr. of Sci. (Med.), Professor, the Siberian State Medical University, Tomsk, Russia
- Natalia E. Zakharova* — Dr. of Sci. (Med.), Professor of the Russian Academy of Science, N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery, Moscow, Russia
- Elena I. Zyablova* — Dr. of Sci. (Med.), Associate Professor, Scientific Research Institute — Ochapovsky Regional Clinical Hospital No. 1, Krasnodar, Russia
- Alexandra M. Korostyshevskaya* — Dr. of Sci. (Med.), Labor Veteran SI of the Russian Academy of Science, International Tomography Center, Novosibirsk, Russia
- Olga V. Lukina* — Dr. of Sci. (Med.), Pavlov First Saint Petersburg State Medical University, St. Petersburg, Russia
- Igor N. Pronin* — Dr. of Sci. (Med.), Professor, Full Member of the Russian Academy of Sciences, the National Medical Research Centre of Neurosurgery of N. N. Burdenko, Moscow, Russia
- Raushan I. Rakhimzhanova* — Dr. of Sci. (Med.), Professor, Honored Worker of Science, Academician of the Academy of Preventive Medicine, the Astana Medical University, Nur-Sultan, Kazakhstan
- Reinmuller Rainer* — Dr. of Sci. (Med.), Professor, Graz, Austria
- Rizzo Stefania* — Dr. of Sci. (Med.), Radiology Clinic, Lugano, Switzerland
- Elena V. Sinelnikova* — Dr. of Sci. (Med.), Professor, Saint Petersburg State Pediatric Medical University, St. Petersburg, Russia
- Andrei A. Stanzhevskii* — Dr. of Sci. (Med.), Russian Research Centre of Radiology and Surgical Techniques of A. M. Granov, St. Petersburg, Russia
- Marina B. Sukhova* — Dr. of Sci. (Med.), Associate Professor, the National Research Nizhniy Novgorod State University of N. I. Lobachevskiy, Nizhniy Novgorod, Russia
- Gennadiy Ye. Trufanov* — Dr. of Sci. (Med.), Professor, the National Medical Research Centre of V. A. Almazov, St. Petersburg, Russia
- Andrey A. Tulupov* — Dr. of Sci. (Med.), Professor of the Russian Academy of Science, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, The Institute International Tomography Center of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia
- Wladimir Yu. Ussov* — Dr. of Sci. (Med.), Professor, the Academician E. N. Meshalkin National Medical Research Center, Novosibirsk, Russia
- Filippo Del Grande* — Dr. of Sci. (Med.), Radiology Clinic, Lugano, Switzerland
- Marina A. Chibisova* — Dr. of Sci. (Med.), Professor, North-Western State Medical University named after I. I. Mechnikov, Russia

СОДЕРЖАНИЕ

ЛЕКЦИИ И ОБЗОРЫ

ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ НЕСПЕЦИФИЧЕСКОГО АОРТОАРТЕРИИТА ТАКАЯСУ: ОБЗОР	7
<i>Р. А. Постаногов, Н. В. Марченко, Д. А. Малеков, С. В. Виниченко, Е. В. Кудрявцева</i>	
МЕТОДЫ РЕДАКТИРОВАНИЯ ¹ H-МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ: ЛЕКЦИЯ	22
<i>Т. А. Ахадов, М. В. Ублинский, А. Н. Яковлев, О. В. Божко</i>	
ВОЗМОЖНОСТИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В КЛАССИФИКАЦИИ ПАТОЛОГИЙ ПОЗВОНОЧНИКА НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ РАЗВИТИЯ: СИСТЕМАТИЧЕСКИЙ ОБЗОР	31
<i>К. О. Васильев, В. Л. Лукинов, В. В. Рерих</i>	

ОРИГИНАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

МУЛЬТИПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НОСОВОЙ ПЕРЕГОРОДКИ: ПРОСПЕКТИВНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ	43
<i>А. Р. Кормилина, Н. С. Серова, М. Г. Тухбатуллин, Р. С. Байбиков</i>	
НАТИВНОЕ T1-КАРТИРОВАНИЕ И ФРАКЦИЯ ВНЕКЛЕТОЧНОГО ОБЪЕМА ПЕЧЕНИ И СЕЛЕЗЕНКИ В СТРАТИФИКАЦИИ ЦИРРОЗА ПЕЧЕНИ ПО КЛАССАМ ШКАЛЫ ЧАЙЛД-ПЬЮ: РЕТРОСПЕКТИВНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ	51
<i>Ю. Н. Савченков, Г. Е. Труфанов, В. А. Фокин, Е. А. Ионова, А. П. Савченкова, В. А. Просиков, С. Э. Аракелов</i>	
УЛЬТРАЗВУКОВАЯ СЕМИОТИКА ИЗМЕНЕНИЙ МОЛОЧНЫХ ЖЕЛЕЗ ПОСЛЕ МАЛОИНВАЗИВНОГО ХИРУРГИЧЕСКОГО ЛЕЧЕНИЯ ДОБРОКАЧЕСТВЕННЫХ НОВООБРАЗОВАНИЙ: НАБЛЮДАТЕЛЬНОЕ АНАЛИТИЧЕСКОЕ ПРОСПЕКТИВНОЕ КОГОРТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ	61
<i>Е. А. Марущак, Е. А. Зубарева, Е. П. Фисенко</i>	
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНОЙ ТОМОГРАФИИ С ДИНАМИЧЕСКИМ КОНТРАСТНЫМ УСИЛЕНИЕМ В ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКЕ МАММОГРАФИЧЕСКИ ВЫЯВЛЯЕМЫХ АСИММЕТРИЙ МОЛОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ: ПРОСПЕКТИВНОЕ КОГОРТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ	74
<i>С. Н. Меринов, Д. В. Пасынков, М. Г. Тухбатуллин, М. А. Михальцова, О. В. Бусыгина, Е. А. Романьчева, Е. А. Петров</i>	
ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ ТОЧНОСТЬ И СОГЛАСОВАННОСТЬ ИИ-СЕРВИСОВ МЕЖДУ СОБОЙ И С ВРАЧОМ-ЭКСПЕРТОМ ПРИ ОЦЕНКЕ МАММОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ШКАЛЕ BI-RADS: РЕТРОСПЕКТИВНОЕ АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ	86
<i>А. С. Азарян, М. Ю. Хрустачева, Л. Д. Пестренин, Ю. А. Васильев, А. В. Владимирский, О. В. Омелянская, А. С. Доможирова, К. М. Арзамасов, А. С. Гацук</i>	
РАДИОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ В ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ ТКАНЕЙ НАДОСТНОЙ МЫШЦЫ ПРИ МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНОЙ ТОМОГРАФИИ: РЕТРОСПЕКТИВНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ	98
<i>А. А. Жиялков, В. С. Блинов, П. Ф. Чернавин, А. В. Жиялков</i>	
РЕНТГЕНОВСКАЯ ДЕНСИТОМЕТРИЯ КАК ИНСТРУМЕНТ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МИНЕРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ КОСТЕЙ У ДЕТЕЙ С СИНДРОМОМ МАЛЬАБСОРБЦИИ: ПРОСПЕКТИВНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ	110
<i>Е. А. Мельникова, М. В. Редькина, К. К. Панунцева, Н. В. Марченко</i>	
НАБЛЮДЕНИЕ ИЗ ПРАКТИКИ	
ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ СЛОЖНОСТИ ДЕЦИДУАЛИЗИРОВАННОЙ ЭНДОМЕТРИОМЫ ЯИЧНИКА, ИМИТИРУЮЩЕЙ ЗЛОКАЧЕСТВЕННУЮ ОПУХОЛЬ ПРИ БЕРЕМЕННОСТИ: РОЛЬ МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНОЙ ТОМОГРАФИИ С КОНТРАСТНЫМ УСИЛЕНИЕМ: КЛИНИЧЕСКИЙ СЛУЧАЙ	117
<i>А. И. Тащилкин, С. П. Нарзиева, Н. В. Марченко, А. Н. Тайц, И. А. Ершов</i>	
ВОЗМОЖНОСТИ РЕНТГЕНОГРАФИИ В ДИАГНОСТИКЕ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМ ГИПОФОСФАТАЗИИ: КЛИНИЧЕСКИЙ СЛУЧАЙ	123
<i>И. В. Басек, Е. Ю. Гуркина, Л. Г. Константинова, С. С. Седова, Е. В. Горбунова</i>	

CONTENTS

LECTURES AND REVIEWS

POSSIBILITIES AND PROSPECTS OF DIAGNOSTIC IMAGING OF NON-SPECIFIC TAKAYASU AORTOARTERITIS: A REVIEW	7
<i>R. A. Postanogov, N. V. Marchenko, D. A. Malekov, S. V. Vinichenko, E. V. Kudryavceva</i>	
SPECTRAL EDITING IN ¹ H-MAGNETIC RESONANCE SPECTROSCOPY: A LECTURE	22
<i>T. A. Akhadov, M. V. Ublinskiy, A. N. Yakovlev, O. V. Bozhko</i>	
POSSIBILITIES OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN CLASSIFICATION OF SPINAL PATHOLOGIES AT THE PRESENT STAGE OF DEVELOPMENT: A SYSTEMATIC REVIEW	31
<i>K. O. Vasilyev, V. L. Lukinov, V. V. Rerikh</i>	

ORIGINAL RESEARCH

MULTIPARAMETRIC ULTRASOUND EXAMINATION OF THE NASAL SEPTUM: A PROSPECTIVE STUDY	43
<i>A. R. Kormilina, N. S. Serova, M. G. Tukhbatullin, R. S. Baybikov</i>	
NATIVE T1 MAPPING AND LIVER AND SPLENIC EXTRACELLULAR VOLUME FRACTION IN THE STRATIFICATION OF LIVER CIRRHOSIS ACCORDING TO CHILD-PUGH CLASSES: A RETROSPECTIVE STUDY	51
<i>Yu. N. Savchenkov, G. E. Trufanov, V. A. Fokin, E. A. Ionova, A. P. Savchenkova, V. A. Proshkov, S. E. Arakelov</i>	
ULTRASONIC SEMIOTICS OF BREAST CHANGES AFTER MINIMALLY INVASIVE SURGICAL TREATMENT OF BENIGN NEOPLASMS: OBSERVATIONAL ANALYTICAL: A PROSPECTIVE COHORT STUDY	61
<i>E. A. Marushchak, E. A. Zubareva, E. P. Fisenko</i>	
MAGNETIC RESONANCE IMAGING WITH DYNAMIC CONTRAST ENHANCEMENT IN THE DISCRIMINATION OF MAMMOGRAPHICALLY REVEALED ASYMMETRIC DENSITY: A PROSPECTIVE COHORT STUDY	74
<i>S. N. Merinov, D. V. Pasynkov, M. G. Tukhbatullin, M. A. Mikhaltsova, O. V. Busygina, E. A. Romanycheva, E. A. Petrov</i>	
DIAGNOSTIC ACCURACY AND AGREEMENT OF AI SERVICES AMONG THEMSELVES AND WITH MEDICAL EXPERT IN EVALUATING MAMMOGRAPHY USING THE BI-RADS SCALE: A RETROSPECTIVE ANALYTICAL STUDY	86
<i>A. S. Azaryan, M. Yu. Khrustacheva, L. D. Pestrenin, Yu. A. Vasilev, A. V. Vladzmyrskyy, O. V. Omelyanskaya, A. S. Domozhirova, K. M. Arzamasov, A. S. Gatsuk</i>	
RADIOMIC ANALYSIS IN THE ASSESSMENT OF SUPRASPINATUS MUSCLE TISSUE STATUS ON MAGNETIC RESONANCE IMAGING: A RETROSPECTIVE STUDY	98
<i>A. A. Zhilyakov, V. S. Blinov, P. F. Chernavin, A. V. Zhilyakov</i>	
X-RAY DENSITOMETRY AS A TOOL FOR DETERMINING BONE MINERAL DENSITY CHILDREN WITH MALABSORPTION SYNDROME: A PROSPECTIVE STUDY	110
<i>E. A. Melnikova, M. V. Redkina, K. K. Panuntseva, N. V. Marchenko</i>	

PRACTICAL CASES

DIAGNOSTIC CHALLENGES OF A DECIDUALIZED OVARIAN ENDOMETRIOMA MIMICKING A MALIGNANT TUMOR DURING PREGNANCY: THE ROLE OF CONTRAST-ENHANCED MAGNETIC RESONANCE IMAGING: A CLINICAL CASE	117
<i>A. I. Tashilkin, S. P. Narzieva, N. V. Marchenko, A. N. Taits, I. A. Ershov</i>	
THE ROLE OF RADIOGRAPHY IN THE DIAGNOSIS OF DIFFERENT FORMS OF HYPOPHOSPHATASIA: A CLINICAL CASE	123
<i>I. V. Basek, E. Yu. Gurkina, L. G. Konstantinova, S. S. Sedova, E. V. Gorbunova</i>	

ЛЕКЦИИ И ОБЗОРЫ / LECTURES AND REVIEWS

УДК 616-036.8-08-06 (075)

<http://doi.org/10.22328/2079-5343-2026-17-2-7-21>**ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ
НЕСПЕЦИФИЧЕСКОГО АОРТОАРТЕРИИТА ТАКАЯСУ: ОБЗОР**^{1,2}Р. А. Постаногов[✉], ³Н. В. Марченко[✉], ¹Д. А. Малеков[✉], ⁴С. В. Виниченко[✉], ⁵Е. В. Кудрявцева[✉]¹Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Санкт-Петербург, Россия²Городская больница Святой преподобномученицы Елизаветы, Санкт-Петербург, Россия³Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия⁴Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт фтизиопульмонологии, Санкт-Петербург, Россия⁵Санкт-Петербургский медико-социальный институт, Санкт-Петербург, Россия

ВВЕДЕНИЕ: Неспецифический аортоартериит Такаясу — хронический воспалительный системный васкулит, поражающий крупные сосуды, преимущественно аорту и ее ветви. Заболевание чаще встречается у молодых женщин и приводит к прогрессирующему стенозу, окклюзии, аневризмам сосудов и тяжелым системным осложнениям. Диагностика болезни Такаясу основывается на комплексной оценке клинической картины, лабораторных данных, а также данных, полученных с использованием визуализационных методов, таких как магнитно-резонансная и компьютерная ангиография, ультразвуковое исследование, позитронно-эмиссионная томография, цифровая субтракционная рентгеновская ангиография. Точная диагностика имеет критическое значение для своевременного начала терапии и профилактики осложнений.

ЦЕЛЬ: Осветить основные аспекты этиопатогенеза и клинической картины заболевания. Проанализировать и систематизировать современные возможности диагностической визуализации при болезни Такаясу, опираясь на консенсус профессиональных сообществ ACR/EULAR-2022. Продемонстрировать типичные лучевые паттерны заболевания. Осветить возможности и перспективы новых диагностических методик, в том числе спектральной (двухэнергетической) компьютерной томографии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ: Проведен поиск в научных базах PubMed/MEDLINE, Web of Science, eLIBRARY при помощи ключевых слов: «неспецифический аортоартериит Такаясу», «болезнь Такаясу» в сочетании с «лучевая диагностика», «УЗИ», «МРТ», «спектральная КТ», «ПЭТ-КТ». Критерии включения: руководства профессиональных обществ (EULAR, ACR/VF), систематические обзоры/мета-анализы и оригинальные исследования по визуализации болезни Такаясу. Исключались дубликаты и нерелевантные публикации. Извлекались сведения об этиопатогенезе заболевания, задачах методов диагностики, диагностических критериях, точности методов, ограничениях и дозовой нагрузке.

РЕЗУЛЬТАТЫ: Проанализированы 173 научные публикации, 36 из которых использованы для составления настоящего обзора. В обзоре представлены данные об основных аспектах этиопатогенеза болезни Такаясу, его клинических диагностических критериях, освещены вопросы мультимодальной визуализационной диагностики заболевания с указанием чувствительности и специфичности методов, рассмотрены возможности и перспективы спектральной (двухэнергетической) компьютерной томографии и других новых диагностических методик.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ: Современные методы диагностической визуализации играют ключевую роль в диагностике и мониторинге лечения болезни Такаясу. Их применение в соответствии с решаемой клинической задачей вносит значительный вклад в комплексную диагностику заболевания, что позволяет выработать оптимальную тактику лечения, направленную на снижение рисков осложнений и улучшение качества жизни пациентов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: неспецифический аортоартериит Такаясу, болезнь Такаясу, магнитно-резонансная ангиография, компьютерная томография, спектральная двухэнергетическая компьютерная томография, ультразвуковое исследование

*Для корреспонденции: Постаногов Роман Анатольевич, e-mail: r.a.postanogov@yandex.ru

Для цитирования: Постаногов Р.А., Марченко Н.В., Малеков Д.А., Виниченко С.В., Кудрявцева Е.В. Возможности и перспективы диагностической визуализации неспецифического аортоартериита Такаясу: обзор // *Лучевая диагностика и терапия*. 2026. Т. 17, № 2. С. 7–21, doi: <http://doi.org/10.22328/2079-5343-2026-17-2-7-21>.

POSSIBILITIES AND PROSPECTS OF DIAGNOSTIC IMAGING OF NON-SPECIFIC TAKAYASU AORTOARTERITIS: A REVIEW

^{1,2}Roman A. Postanogov[✉], ³Natalya V. Marchenko[✉], ¹Damir A. Malekov[✉], ⁴Sofia V. Vinichenko[✉],
⁵Ekaterina V. Kudryavceva[✉]

¹St. Petersburg State Pediatric Medical University, St. Petersburg, Russia

²Elizavetinskaya City Hospital, St. Petersburg, Russia

³St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

⁴St. Petersburg Research Institute of Phthisiopulmonology, St. Petersburg, Russia

⁵St. Petersburg Medical and Social Institute, St. Petersburg, Russia

INTRODUCTION: Takayasu's aortoarteritis (TA) is a chronic inflammatory systemic vasculitis affecting large vessels, primarily the aorta and its branches. The disease is more common in young women and leads to progressive stenosis, occlusion, aneurysms, and severe systemic complications.

Diagnosis of Takayasu's disease is based on a comprehensive assessment of the clinical picture, laboratory data, and imaging techniques such as magnetic resonance angiography, computed tomography angiography, ultrasound, positron emission tomography, and digital subtraction X-ray angiography. Accurate diagnosis is critical for timely initiation of therapy and prevention of complications.

OBJECTIVE: To highlight the key aspects of the etiopathogenesis and clinical presentation of the disease. To analyze and systematize current diagnostic imaging capabilities for Takayasu's disease, based on the ACR/EULAR-2022 consensus of professional societies. To demonstrate typical radiographic patterns of the disease. To highlight the capabilities and prospects of new diagnostic techniques, including spectral (dual-energy) computed tomography.

MATERIALS AND METHODS: A search was conducted in the scientific databases PubMed/MEDLINE, Web of Science, eLibrary using keywords: «nonspecific Takayasu's aortoarteritis», «Takayasu's disease», in combination with «radiation diagnostics», «ultrasound», «MRI», «spectral CT», «PET-CT». Inclusion criteria: professional society guidelines (EULAR, ACR/VF), systematic reviews/meta-analyses, and original studies on the imaging of Takayasu's disease. Duplicates and irrelevant publications were excluded. Data on the etiopathogenesis of the disease, the objectives of diagnostic methods, diagnostic criteria, the accuracy of the methods, limitations, and dose load were extracted.

RESULTS: A total of 173 scientific publications were analyzed, 36 of which were used to compile this review. This review presents data on the key aspects of the etiopathogenesis of Takayasu's disease and its clinical diagnostic criteria. It also highlights issues of multimodal imaging diagnostics, indicating the sensitivity and specificity of diagnostic techniques. It also examines the capabilities and prospects of spectral (dual-energy) computed tomography and other new imaging techniques.

CONCLUSION: Modern diagnostic imaging methods play a key role in the diagnosis and treatment monitoring of Takayasu's disease. Their use, in accordance with the clinical task being addressed, significantly contributes to the comprehensive diagnosis of the disease, enabling the development of optimal treatment strategies aimed at reducing the risk of complications and improving patients' quality of life.

KEYWORDS: nonspecific Takayasu aortoarteritis, Takayasu disease, magnetic resonance angiography, computed tomography, spectral dual-energy computed tomography, ultrasound

*For correspondence: Roman A. Postanogov, e-mail: r.a.postanogov@yandex.ru

For citation: Postanogov R.A., Marchenko N.V., Malekov D.A., Vinichenko S.V., Kudryavceva E.V. Possibilities and prospects of diagnostic imaging of non-specific Takayasu aortoarteritis: a review // *Diagnostic radiology and radiotherapy*. 2026. Vol. 17, No. 2. P. 7–21, <http://doi.org/10.22328/2079-5343-2026-17-2-7-21>.

Введение. Системные васкулиты (СВ) — гетерогенная группа заболеваний, основным морфологическим признаком которых является воспаление сосудистой стенки, а клинические проявления зависят от типа, калибра, локализации пораженных сосудов и активности системного воспаления [1]. Среди СВ, поражающих сосуды крупного калибра, особый интерес представляет неспецифический аortoarterиит Такаюсу (болезнь Такаюсу, НАТ).

НАТ является редким гранулематозным системным васкулитом, преимущественно поражающим аорту, ее крупные ветви и (реже) легочные артерии,

с глобальной распространенностью 2–3 случая на 1 млн человек в год. Заболевание поражает преимущественно молодых женщин с пиком заболеваемости от 15 до 19 лет, причем соотношение женщин и мужчин может достигать 8:1 [2].

Наиболее высокую распространенность НАТ имеет в странах Азии, таких как Япония, Китай и Индия. В Северной Америке и Европе болезнь диагностируется значительно реже [2].

Диагностика НАТ основывается на комплексной оценке клинической картины, лабораторных данных, а также данных, полученных с использованием мето-

дов лучевой диагностики, таких как магнитно-резонансная (МРА) и компьютерно-томографическая ангиография (КТА), ультразвуковое исследование (УЗИ), позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ), цифровая субтракционная ангиография (ЦСА). Точная диагностика имеет критическое значение для своевременного начала терапии и профилактики осложнений [3].

Цель. Осветить основные аспекты этиопатогенеза и течения заболевания. Проанализировать и систематизировать современные возможности диагностической визуализации при НАТ, опираясь на консенсус профессиональных сообществ ACR/EULAR-2022. Продемонстрировать типичные лучевые паттерны заболевания. Осветить возможности и перспективы новых методик визуализации, таких как спектральная (двухэнергетическая) компьютерная томография (ДЭКТ). Изложить современные взгляды на место каждого из методов в диагностике болезни Такаясу.

Материалы и методы. Проведен поиск в научных базах PubMed/MEDLINE, Web of Science, eLIBRARY при помощи ключевых слов: «неспецифический аортоартериит Такаясу», «болезнь Такаясу», в сочетании с «лучевая диагностика», «УЗИ», «МРТ», «спектральная КТ», «ПЭТ-КТ». Критерии включения: руководства профессиональных обществ (EULAR, ACR/VF), систематические обзоры/мета-анализы и оригинальные исследования по визуализации болезни Такаясу. Исключались дубликаты и нерелевантные публикации. Извлекались сведения об этиопатогенезе заболевания, задачах методов диагностики, диагностических критериях, точности методов, ограничениях и дозовой нагрузке.

Результаты. Этиопатогенез. Ключевым звеном в патогенезе НАТ является хроническое гранулематозное воспаление стенок крупных артерий аутоиммунной природы. В качестве триггера обсуждаются инфекционные агенты (в том числе *Mycobacterium tuberculosis*), активирующие дендритные клетки адвентиции сосудов и макрофаги с продукцией провоспалительных цитокинов и последующим Т-клеточным ответом, что поддерживает хроническое воспаление и ремоделирование сосудистой стенки [3].

Воспаление инициируется со стороны адвентиции и *vasa vasorum*, распространяется на медию и интиму с формированием гранулем с гигантскими клетками, утолщением и фиброзом стенки, сужением просвета и развитием стенозов/окклюзий; возможны аневризмы вследствие ослабления стенки и формирование коллатералей для компенсации ишемии. Эндотелиальная дисфункция и ремоделирование способствуют тромбообразованию и гиперкоагуляции, что повышает риск ишемических событий, таких как ишемический инсульт и инфаркт миокарда [2, 4].

Клиническая картина. Клинические проявления НАТ варьируют от неспецифических симптомов

системного воспаления до тяжелых сосудистых осложнений в зависимости от фазы течения заболевания. На ранней активной стадии (недели-месяцы от начала заболевания) преобладают лихорадка, похудание, миалгии и артралгии, головные боли, одышка; течение может быть ремиттирующим, что затрудняет диагностику.

Поздняя «сосудистая» стадия характеризуется ишемией органов и конечностей вследствие стенозов и окклюзий; типичны межконечностная разница систолического артериального давления, ослабление/отсутствие пульса на плечевых артериях, сосудистые шумы. Сердечно-сосудистые проявления встречаются часто и зависят от локализации сосудистого поражения (в том числе гипертензия при стенозе почечных артерий, аортальная регургитация, сердечная недостаточность) [2, 3].

В настоящее время отмечается улучшение прогноза по сравнению с историческими наблюдениями, однако при дебюте в детском возрасте риск смерти выше, чем у взрослых. В детском возрасте показатель летальности при НАТ достигает 35% [5].

Диагностика. Специфических сывороточных маркеров НАТ не существует, характерны повышенные СОЭ/СРБ при активности заболевания. Биопсия крупных артерий проводится редко (как правило, по хирургическим показаниям) и не относится к рутинным методам подтверждения НАТ. В реальной практике ключевую роль в верификации играют методы визуализации в соответствии с актуальными рекомендациями. Отмечается, что среднее время от момента манифестации заболевания до постановки диагноза составляет 1–2 года [3].

В соответствии с локализацией поражения, установленной по данным диагностической визуализации, принята анатомическая классификация НАТ по Numaо (1994), в рамках которой выделяют пять типов заболевания в зависимости от вовлечения в процесс аорты и ее ветвей. Классификация основана на результатах ЦСА и применяется по сей день [6].

Международным научным сообществом для верификации НАТ применяются совместные критерии Американской коллегии ревматологов (American College of Rheumatology, ACR) и Европейская антиревматической лиги (European League Against Rheumatism, EULAR), последний пересмотр которых состоялся в 2022 г. (консенсус ACR/EULAR-2022), учитывающие клинические данные, а также результаты лабораторных и инструментальных исследований. Согласно критериям, абсолютными требованиями для постановки диагноза являются возраст меньше 60 лет на момент манифестации и признаки васкулита крупных сосудов по данным визуализации.

Новые критерии демонстрируют чувствительность 93,8% и специфичность 99,2%, превосходя критерии ACR-1990 [7, 8].

Дифференциальная диагностика включает врожденные и приобретенные поражения аорты (коарктация,

срединный аортальный синдром, фибромускулярная дисплазия), синдром Марфана и иные наследственные аортопатии, а также другие первичные/вторичные васкулиты (гигантоклеточный артериит, болезнь Бехчета, IgG4-связанное поражение и др.) [1, 4].

В рамках консенсуса ACR/EULAR-2022 в 2023 г. были разработаны рекомендации по диагностической визуализации НАТ. Согласно им, предпочтение отдается неинвазивным методам: МРТ/МРА, КТ/КТА, УЗИ, ПЭТ-КТ [12]. Инвазивные методы, такие как ЦСА, для первичной диагностики не рекомендуются, только если они не сопряжены с реваскуляризирующим вмешательством или измерением градиентов давления при критических стенозах [8, 9].

Частота повторных исследований с целью динамического наблюдения определяется клинической задачей, при мониторинге желательно придерживаться одной и той же модальности. Рутинная повторная визуализация всем больным не требуется, но показана при подозрении на рецидив или для оценки прогрессирования внутрисосудистых изменений (стенозы/аневризмы) [8].

Целесообразно рассмотрение методов диагностической визуализации в порядке приоритетности, в соответствии с рекомендациями ACR/EULAR, с указанием их возможностей, ограничений и типичных диагностических паттернов заболевания.

Магнитно-резонансная томография. МРТ/МРА — неинвазивный, не сопряженный с дозовой нагрузкой метод, позволяющий одновременно оценить как воспаление стенки сосуда, так и изменения в его просвете. Согласно консенсусу ACR/EULAR, является предпочтительной стартовой модальностью при подозрении на НАТ [8].

Диагностическая ценность. По результатам мета-анализа 57 исследований L. Вагга и соавт. (2018) метод демонстрирует чувствительность 92% и специфичность 90% [10]. Более поздние обзоры также подтверждают высокую точность метода в диагностике факта наличия НАТ [9, 11]. При этом стандартизация критериев активности заболевания по МРТ/МРА остается неоднородной, что требует осторожной интерпретации [8, 11, 12].

Практический протокол. Рекомендовано применение высокопольных томографов с индукцией поля от 1,5 Тл, как минимум 16-канальной радиочастотной приемной катушки, при этом параметры протокола должны обеспечивать хорошее соотношение сигнал/шум для достижения на изображении высокого пространственного разрешения.

Оптимальный охват полем обзора — от дуги аорты до подвздошных артерий с включением сонных/подключичных/почечных бассейнов при необходимости. Следует использовать как стандартные T1-взвешенные изображения (ВИ) до и после введения парамагнитного контрастного вещества на основе гадолиния (преимущество лучше отдавать 3D-последовательностям (SPACE/FIESTA/CUBE),

T2-ВИ, в том числе с подавлением сигнала от жировой ткани (T2 FS, STIR/SPAIR или Dixon), и контрастную 3D-МРА. При противопоказаниях к гадолинию — бесконтрастные варианты ангиографии (TOF или PC). Также в протоколы следует включать диффузионно-взвешенные изображения с b-фактором не менее 1000 [8, 9, 12].

Лучевые паттерны. К ключевым признакам НАТ относятся: циркулярное утолщение стенок аорты и магистральных артерий, отек стенок на T2-ВИ, активное контрастное усиление на T1-ВИ, изменения просвета сосудов (стенозы, окклюзии, аневризмы), нередко многоуровневые. Считается, что активность НАТ по МРТ/МРА подтверждают сочетанием признаков: отек стенки по T2-ВИ и ее раннее контрастирование, при этом изолированное утолщение без контрастирования следует трактовать осторожно, скорее в пользу неактивной фазы (ремоделирование/фиброз) [4, 11, 12]. М. Копо и соавт. (2021) установлено, что отсроченное контрастирование стенки может быть чувствительно к ее ремоделированию [13]. На основании критерия контрастирования X. Guo и соавт. (2023) отмечают высокую согласованность данных активности по результатам МРТ/МРА с данными ПЭТ-КТ для легочных артерий [14]. Y. Kuroiwa и соавт. (2017) установили, что для активного воспаления характерно истинное ограничение диффузии сосудистой стенкой, отсутствующее у пациентов в ремиссии [15].

На рис. 1 и 2 продемонстрированы ключевые диагностические паттерны заболевания по данным МРТ/МРА.

Ограничения. При выполнении МРТ/МРА возможна переоценка степени стеноза при медленном или турбулентном кровотоке и, как правило, ограничена визуализация мелких дистальных артериальных ветвей. Помимо этого, методика подвержена двигательным и дыхательным артефактам. Критерии оценки активности воспаления по данным МРТ/МРА варьируют между исследованиями и зависят от протокола, стадии заболевания и временной точки после начала терапии, поэтому для подтверждения активного воспаления целесообразно сопоставление МР-картины с клинической картиной, лабораторными данными и/или результатами ПЭТ-КТ. В связи с этим применение метода для динамического наблюдения НАТ остается предметом исследований [16].

Компьютерная томография. Является доступной методикой с высоким пространственным разрешением, служащей для оценки поражения аорты и ее ветвей, уточнения степени стенозов/окклюзий, визуализации аневризм и коллатералей, а также для предоперационного планирования. Согласно консенсусу ACR/EULAR, КТ/КТА — равноправная альтернатива МРТ/МРА. Метод целесообразно применять при наличии противопоказаний к МРТ или если данный метод недоступен в конкретном

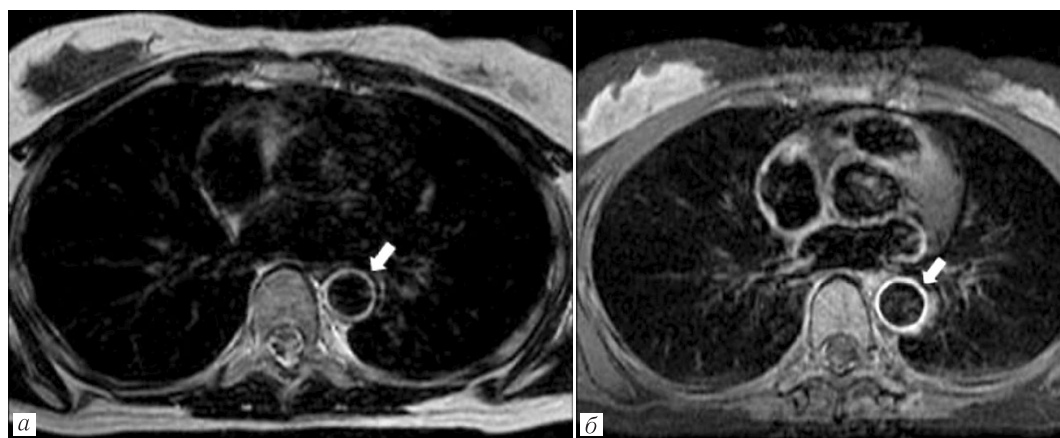


Рис. 1. МРТ 18-летней пациентки с НАТ: *а* — T2-ВИ; *б* — T1-ВИ+Gd. Пораженная стенка аорты демонстрирует слабое утолщение и кольцевидное повышение сигнала вдоль интимы (*а*, стрелка), а также активное накопление парамагнетика (*б*, стрелка)

Fig. 1. MRI of an 18-year-old patient with NTA: *a* — T2-WI; *б* — T1-WI+Gd [12]. The inflamed aortic wall demonstrates mild thickening and ring-shaped signal enhancement along the intima (*a*, arrow), and active paramagnetic enhancement (*б*, arrow) [12]

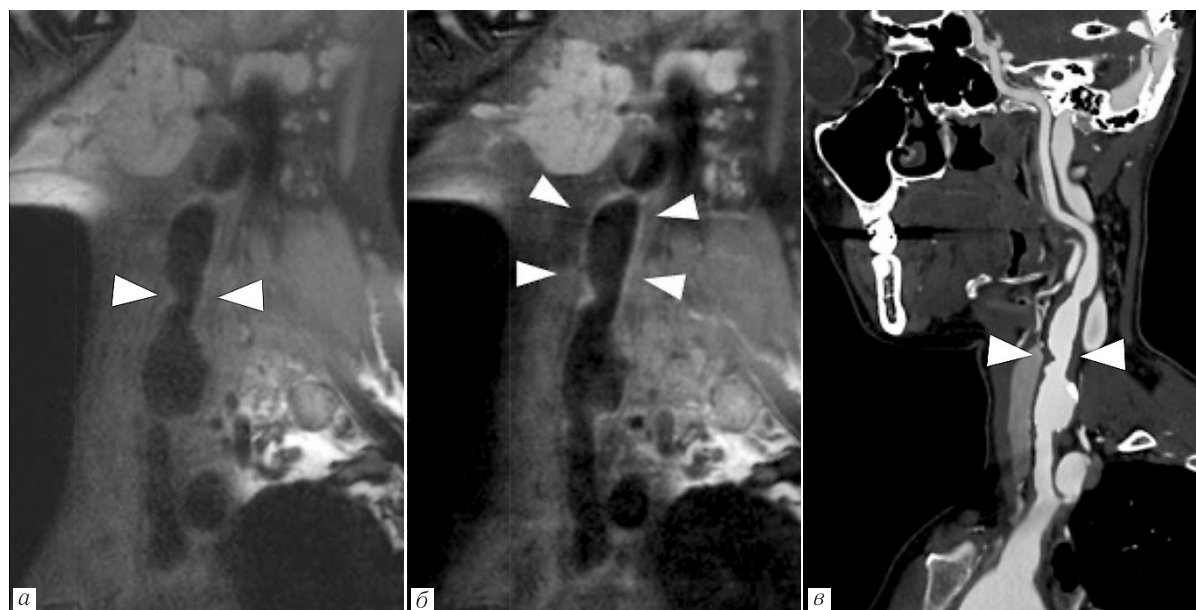


Рис. 2. МРТ и КТА 38-летней пациентки с НАТ: *а* — T1-ВИ; *б* — T1-ВИ+Gd; *в* — КТА, артериальная фаза. Неоднородное утолщение стенки правой общей сонной артерии с формированием стеноза (*а*, *в*, стрелки).

Пораженная стенка демонстрирует активное накопление парамагнетика (*б*, стрелки) [13]

Fig. 2. MRI and CT of a 38-year-old patient with NTA: *a* — T1-WI; *б* — T1-WI+Gd; *в* — CTA, arterial phase. Heterogeneous wall thickening of the right common carotid artery with the formation of a stenosis (*а*, *в*, arrows). The inflamed wall demonstrates active accumulation of paramagnetic enhancement (*б*, arrows) [13]

учреждении, а также на поздней стадии заболевания, в связи с большей диагностической ценностью КТ/КТА при визуализации фиброзных изменений и кальцинатов в структуре сосудистой стенки [8].

Диагностическая ценность. По данным мета-анализа Л. Вагга и соавт. (2018), объединенная чувствительность и специфичность КТ/КТА превышает 90% [10]. Недавние исследования также сообщают о высокой диагностической ценности метода в диагностике НАТ, с чувствительностью и специфичностью 90–100% [9, 11].

Практический протокол. Рекомендуемая область сканирования — от восходящей аорты

до подвздошных артерий, дополнительные таргетные серии брахиоцефальных, почечных или мезентериальных артерий при их вовлечении в патологический процесс. Фаза и тайминг: нативная фаза, артериальная фаза с автоматическим болюс-трекингом, венозная фаза (50 сек), отсроченные фазы; при оценке восходящей аорты предпочтительна ЭКГ-синхронизация для снижения пульсационных артефактов. Техника: тонкая коллимация пучка ($\approx 0,6$ мм), реконструкции с толщиной среза 0,5–1 мм, при необходимости оценки динамики обязательна воспроизводимость параметров сканирования. Рекомендовано контрастирование неонным

йодсодержащим контрастом в объеме 50–100 мл с индивидуализацией по массе и скорости инъекции (скорость не менее 4 мл/с) [8, 12].

Лучевые паттерны. К типичному КТ-признаку относят диффузное (часто циркулярное) утолщение стенки аорты и магистральных артерий. Как и по данным МРТ/МРА, характерно выявление изменения просвета сосудов: длинные сегментарные стенозы, «ступенчатые» окклюзии, постстенотические расширения, аневризмы, развитие коллатералей [4, 9, 12]. На контрастных КТ-сериях в венозную фазу хорошо известен знак «двойного кольца» (double-ring sign) или знак «гало», обусловленный выраженным контрастным усилением внешнего слоя сосудистой стенки и меньшим усилением внутреннего слоя. Считается, что усиленное «внешнее кольцо» представляет собой активное воспаление меди и адвентиции, менее усиленное «внутреннее кольцо» — отек интимы [17]. Специфичность использования знака для оценки активности заболевания составляет 100%, чувствительность — от 34% до 57% [9]. В. Снег и соавт. (2019) для оценки активности НАТ, помимо знака «двойного кольца»,

Диагностические паттерны заболевания по данным КТ/КТА продемонстрированы на рис. 2–4.

Ограничения. В отличие от ПЭТ-КТ, активность воспаления по КТ/КТА оценивается опосредованно, несмотря на предлагаемые некоторыми авторами критерии разной степени чувствительности и специфичности. Метод сопряжен с воздействием ионизирующего излучения и йодсодержащего контрастного вещества, что нужно учитывать при исследовании пациентов младшего детского возраста, пациентов с аллергией или снижением функции почек. Помимо прочего, КТ/КТА подвержена дыхательным и пульсационным артефактам, артефактам от внутрисосудистых стентов.

Двухэнергетическая компьютерная томография. По мнению ряда авторов, в диагностике и мониторинге лечения васкулитов крупных сосудов, в том числе НАТ, определенными перспективами обладает ДЭКТ — методика КТ, предполагающая получение двух наборов диагностических данных при высоких и низких энергиях рентгеновского излучения, т.е. в двух энергетических спектрах, из которых посредством алгоритмов постобработки,

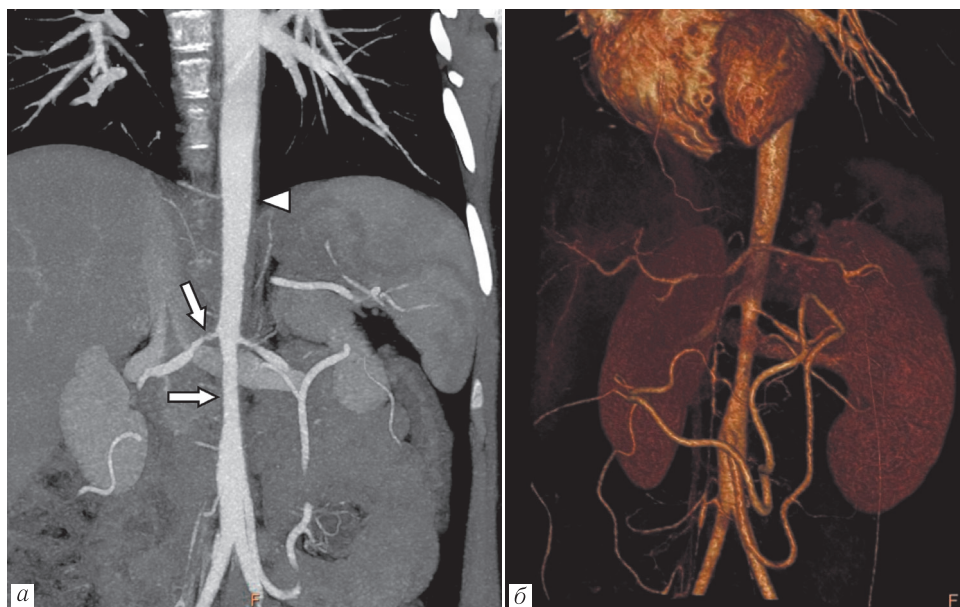


Рис. 3. КТА 16-летней пациентки с НАТ и ренин-зависимой почечной гипертензией, артериальная фаза: *а* — реконструкция в коронарной плоскости; *б* — 3D VRT-реконструкция. Наконечник стрелки указывает на утолщенную стенку аорты с диффузным циркулярным поражением. Стрелками отмечено утолщение стенки правой почечной артерии с сужением просвета и сужение инфраренального отдела аорты [собственные наблюдения]

Fig. 3. CTA of a 16-year-old patient with NTA, arterial phase: *a* — coronal reconstruction; *b* — 3D VRT reconstruction. The arrowhead points to the thickened aortic wall with diffuse circumferential lesion. Arrows indicate thickening of the right renal artery wall with lumen narrowing and narrowing of the infrarenal aorta [personal observations]

предлагают использовать значение толщины стенки пораженного сосуда по данным КТ/КТА: ими установлено, что у пациентов с активным воспалением сосудистая стенка толще, чем у пациентов в неактивной фазе, были определены критические значения ($5,2 \pm 2,4$ мм в активной фазе против $2,5 \pm 0,8$ мм в фазе ремиссии) [18].

создаются «материал-специфические» реконструкции. Такие реконструкции позволяют дифференцировать вещества, одинаковые по плотности, но различные по химическому составу [19]. Консенсус ACR/EULAR рассматривает ДЭКТ как технически оправданное усиление КТ/КТА в случаях, когда эта технология доступна [8].

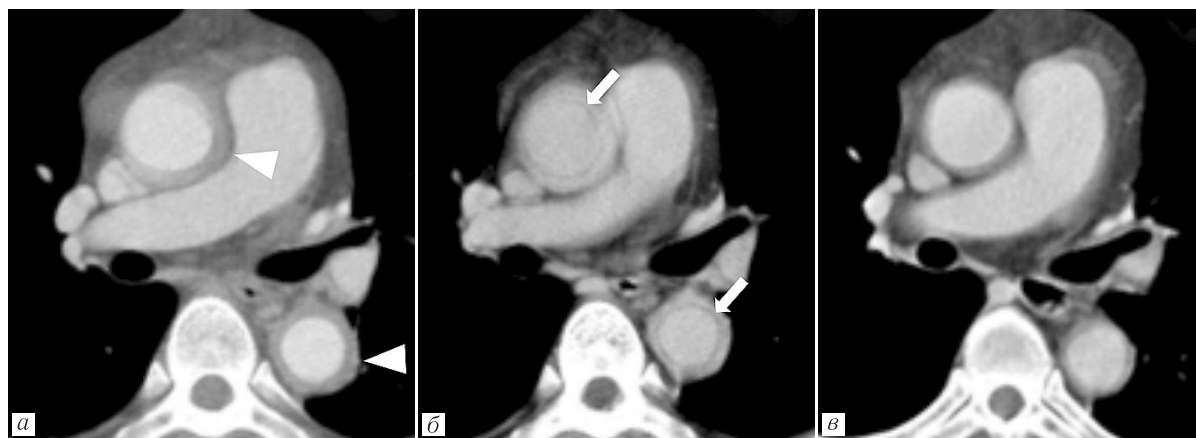


Рис. 4. КТА 34-летнего пациента с НАТ. Первичное исследование: *а* — артериальная фаза; *б* — венозная фаза. Контрольное исследование через 6,5 лет: *в* — венозная фаза. Начальная КТ демонстрирует диффузное утолщение стенки аорты (*а*, наконечники стрелок). В венозной фазе отмечается контрастирование стенки и знак «двойного кольца» (*б*, стрелки). При контрольном исследовании выявлено значительное снижение толщины стенки аорты, регресс контрастирования стенки и отсутствие знака «двойного кольца» [17]

Fig. 4. CTA of a 34-year-old man with NTA. Initial examination: *a* — arterial phase; *б* — venous phase. Follow-up examination after 6.5 years: *в* — venous phase. The initial CT scan demonstrates diffuse thickening of the aortic wall (*a*, arrowheads). In the venous phase, wall enhancement and the «double ring» sign are noted (*б*, arrows). The follow-up examination revealed a significant decrease in aortic wall thickness, regression of wall enhancement, and the absence of the «double ring» sign [17]

Диагностическая ценность. В настоящее время метаанализы, систематизирующие данные о чувствительности и специфичности методики в диагностике НАТ, отсутствуют, имеющиеся данные — немногочисленные клинические случаи, демонстрируют положительные результаты применения некоторых спектральных алгоритмов, в частности йодных карт. При этом, учитывая высокую диагностическую ценность традиционной КТ/КТА, авторы указывают, что ДЭКТ логично ее усиливает, предоставляя новые диагностические возможности: лучший контраст сосудистой стенки, уменьшение артефактов, возможность количественной оценки йода [20].

Практический протокол. В настоящее время для клинического применения доступно несколько типов ДЭКТ-сканеров, использующих для получения наборов данных высокой и низкой энергии разные техники: последовательное сканирование при низком и высоком напряжении на одном источнике; сканирование с двумя независимыми источниками излучения; сканирование с быстрым переключением напряжения на одном источнике; сканирование с постоянным напряжением на одном источнике и двуслойным детектором и другие.

Сканирование рекомендовано осуществлять по стандартам традиционной КТА с внутривенным болюсным контрастированием (описано выше), постобработка осуществляется на специализированной рабочей станции на основе собранных спектральных данных. Предлагается использование следующих алгоритмов постобработки: виртуальные моноэнергетические изображения с энергией 40–60 кэВ для усиления контраста стенки/просвета сосуда; карты йодной плотности с количественной оценкой степени накопления контраста, карты

эффективного атомного номера для дифференцировки кальцинов, йода и мягких тканей, а также виртуальные бесконтрастные серии для замены истинных нативных серий [20, 21].

Лучевые паттерны. Виртуальная моноэнергетическая визуализация с реконструкцией данных, полученных в низкоэнергетическом спектре, увеличивает отношение контраст-шум для йода, тем самым может улучшить визуализацию равномерного или кольцевого усиления стенки аорты и ее ветвей, а также границы стенка/просвет сосуда. Йодная карта демонстрирует распределение контраста в тканях, в том числе в сосудистой стенке, и позволяет количественно оценить его накопление. Степень накопления контраста коррелирует с активностью заболевания, что демонстрирует потенциально высокую диагностическую ценность йодных карт для оценки активности воспаления и эффективности терапии [21]. Карта эффективного атомного номера отражает среднее значение атомных номеров химических элементов, из которых состоит ткань, позволяя различать морфологический субстрат, что может быть полезно при дифференциальной оценке изменения сосудистой стенки (фиброз стенки, отложение липидов, кальция и другие изменения) [22]. Алгоритм виртуальной неконтрастной карты (получается путем вычитания йодной карты из постконтрастной серии) может заменить нативное сканирование, существенно снижая дозовую нагрузку, что особенно полезно при частом динамическом наблюдении пациентов, а также в педиатрической практике [23].

Пример комплексного применения инструментов спектральной визуализации в диагностике НАТ представлен на рис. 5.

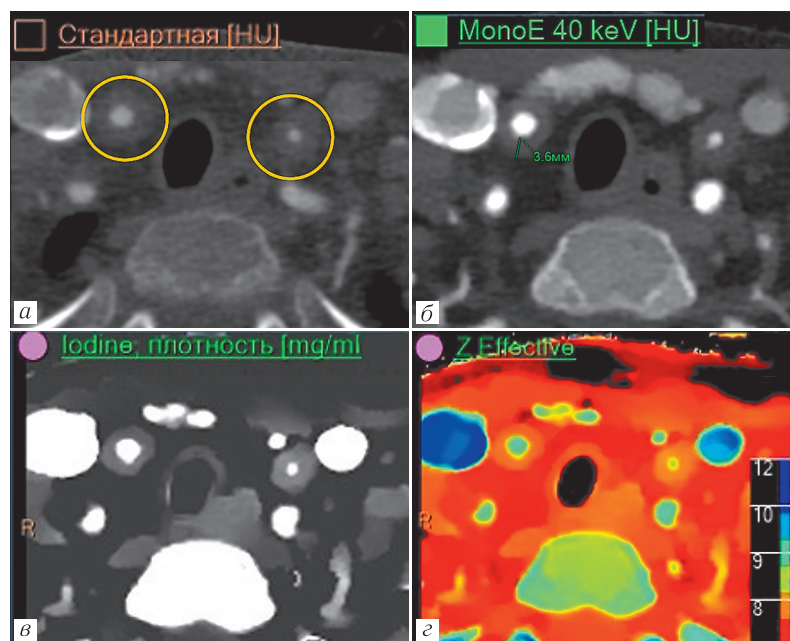


Рис. 5. ДЭКТ-ангиография 8-летней пациентки с НАТ, осложненным стенозом обеих сонных артерий: *а* — традиционные КТ-серии, артериальная фаза; *б* — виртуальное моноэнергетическое изображение с энергией 40 кэВ, артериальная фаза; *в* — карта йодной плотности, венозная фаза; *г* — карта эффективного атомного номера, венозная фаза. На традиционных КТ-сериях пораженные артерии визуализируются субоптимально (*а*, выделены кругами). При спектральной визуализации на моноэнергетическом изображении 40 кэВ отчетливо дифференцируется утолщенный интимальный слой артерий и их сохраненные просветы (*б*), на картах йодной плотности различимы внутренние и внешние границы сосудов, отмечается слабое накопление контрастного препарата воспаленной стенкой (*в*), карты эффективного атомного номера демонстрируют гомогенную структуру утолщенных стенок без патологических включений, отмечается снижение эффективного атомного номера в сравнении с неизменной сосудистой стенкой за счет отека (*г*) [собственные наблюдения]

Fig. 5. DECT angiography of an 8-year-old girl with NTA complicated by stenosis of both carotid arteries: *a* — conventional CT series, arterial phase; *b* — virtual monoenergetic image 40 keV, arterial phase; *в* — iodine density map, venous phase; *г* — effective atomic number map, venous phase. In conventional CT series, the affected arteries are visualized suboptimally (*a*, highlighted by circles). In spectral visualization, the thickened intimal layer of the arteries and their preserved lumens are clearly differentiated on a monoenergetic image of 40 keV (*б*); the internal and external boundaries of the vessels are distinguishable on iodine density maps; weak accumulation of the contrast agent by the inflamed wall is noted (*в*); the maps of the effective atomic number demonstrate a homogeneous structure of the thickened walls without pathological inclusions; a decrease in the effective atomic number is noted in comparison with the unchanged vascular wall due to edema (*г*) [personal observations]

Ограничения. На сегодняшний день для НАТ и других васкулитов крупных сосудов не предложено валидированных пороговых значений концентрации йода, позволяющих достоверно дифференцировать активную и неактивную фазу заболевания. Исследователи, как правило, используют собственные пороговые значения, полученные на малых выборках. При этом отмечается вариабельность показателей в зависимости от протокола исследования и типа сканера [24]. В связи с этим оценка концентрации йода по картам йодной плотности, несмотря на свою потенциально высокую диагностическую ценность, пока не может служить самостоятельным критерием активности и должна интерпретироваться только в контексте клинико-лабораторных данных и результатов ПЭТ-КТ [8]. Помимо прочего, ДЭКТ предъявляет высокие требования к качеству постобработки спектральных данных и опыту их интерпретации.

Ультразвуковое исследование. УЗИ и дуплексное сканирование (ДС) магистральных артерий относятся к доступным и неинвазивным методам визуализации, которые вносят существенный вклад в раннюю диагностику НАТ. УЗИ/ДС наиболее информативно при оценке изменений общих сонных, позвоночных и подключичных артерий, брахиоцефального ствола, почечных артерий. Согласно консенсусу ACR/EULAR, УЗИ рассматривается как альтернативный метод первичной визуализации при вовлечении в патологический процесс вышеперечисленных артерий, а также как один из основных инструментов долгосрочного мониторинга внутрисосудистых изменений (стенозы, окклюзии, аневризмы) [8]. Определенные перспективы в оценке активности заболевания представляет контраст-усиленное УЗИ (КУ-УЗИ) и микродоплеровское картирование кровотока (superb microvascular imaging, SMI) [12].

Диагностическая ценность. L. Вагга и соавт. (2018) сообщают об объединенной чувствительности УЗИ крупных артерий порядка 81 % и специфичности более 90 % [10].

Практический протокол. Рекомендовано использовать аппараты УЗИ экспертного класса с датчиками: линейный с частотой от 5 до 15 МГц и конвексный с частотой от 2 до 7 МГц. Протокол включает: сканирование общей, внутренней и наружной сонных артерий, подключичных и, при возможности, аксиллярных артерий в продольной и поперечной плоскостях; оценку позвоночных артерий (сегменты V₁–V₂), брюшной аорты и проксимальных отделов почечных артерий. При исследовании артерий в В-режиме выполняются стандартизированные измерения толщины стенки, комплекса интима–медиа с документированием максимальных значений и их динамики. При доплеровском сканировании производят регистрацию спектров кровотока в предполагаемых зонах стенозов и дистальнее с измерением пиковых систолических скоростей, расчетом относительного снижения просвета

скоростей, постстенотическую турбулентность, изменение спектра кровотока, возможное формирование коллатералей. При вовлечении почечных артерий и брюшной аорты могут выявляться значительные градиенты давления и характерные изменения спектра кровотока [25].

Критерии оценки активности НАТ по данным метода не стандартизированы и являются предметом исследований. Некоторые авторы считают перспективным применение КУ-УЗИ для оценки активности воспаления [26, 27]. Методика предполагает внутривенное введение препарата с микропузырьками газа, которые служат внутрисосудистыми маркерами, позволяющими количественно оценить микрососудистую перфузию артериальной стенки. Z. Li и соавт. (2019) показано, что интенсивность контрастирования и динамика перфузионных кривых коррелируют с клинической активностью НАТ и данными ПЭТ-КТ (для сонной артерии КУ-УЗИ продемонстрировало 100 % чувствительность и 80 % специфичность), в связи с чем авторы считают методику применимой в оценке активности заболевания [27].

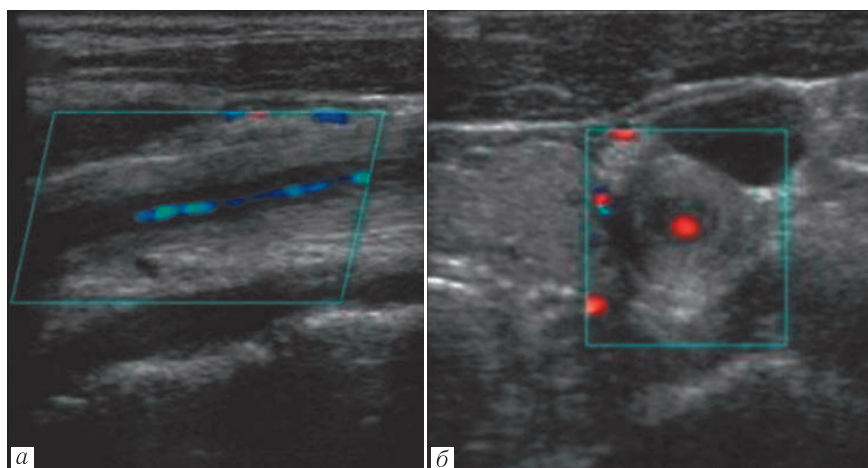


Рис. 6. УЗИ общей сонной артерии 14-летней пациентки с НАТ, В-режим с цветовым доплеровским картированием: *а* — длинная ось; *б* — короткая ось. Отмечается однородное циркулярное утолщение стенки сосуда — «macaroni sign» [12]

Fig. 6. Ultrasound of the common carotid artery in a 14-year-old patient with NTA, B-mode with color Doppler mapping: *a* — long axis; *b* — short axis. Homogeneous circumferential thickening of the vessel wall — the «macaroni sign» [12]

и оценкой гемодинамической значимости стенозов. При наличии технической возможности выполняется КУ-УЗИ для уточнения активности воспаления (перфузия стенки, неоваскуляризация) [8, 12].

Лучевые паттерны. В В-режиме стенка пораженной крупной артерии выглядит однородно утолщенной по всей окружности, с ровным внутренним контуром средней или несколько повышенной эхогенности — этот паттерн описывается как «macaroni sign» (знак «макарон») и рассматривается как высокоспецифичный признак НАТ [25].

Паттерн «macaroni sign» продемонстрирован на рис. 6.

Доплеровские режимы полезны в оценке стенозов и окклюзий: повышение пиковых систолических

Другие авторы заявляют о перспективности SMI — доплеровской методики, позволяющей визуализировать низкоскоростной микрососудистый кровоток без введения контрастного препарата за счет алгоритмов дифференцировки истинных сигналов микрокровотока от артефактов движения стенок и шумовых сигналов, что обеспечивает визуализацию мельчайших сосудов, таких как *vasa vasorum*. Данные SMI хорошо согласуются с результатами КУ-УЗИ в диагностике широкого спектра сосудистой патологии. В единичных исследованиях применения методики при НАТ отмечается, что SMI способствует обнаружению неоваскуляризации артериальной стенки [28]. F. J. Liu и соавт. (2023) указали, что неоваскуляризация сонной артерии,

обнаруженная посредством SMI, может быть маркером активности воспаления [29].

Ограничения. Связаны, в первую очередь, с высокой оператор-зависимостью, а также диагностическими пределами метода (ограниченные акустические окна для визуализации восходящей аорты, ее дуги, проксимальных отделов ее крупных ветвей), снижающими чувствительность при преимущественно проксимальном поражении. Количественные критерии (толщина стенки, скоростные пороги) стандартизированы не в полной мере, и, хотя в последние годы предложены различные ультразвуковые шкалы и индексы, необходима их дальнейшая валидация, что подчеркивается в рекомендациях ACR/EULAR [8]. Ограничения КУ-УЗИ включают потерю преимуществ ультразвука (таких как неинвазивность и простота использования) из-за применения контрастного агента, а также необходимость дополнительного обучения для интерпретации результатов. Технология SMI доступна лишь на экспертных сканерах некоторых производителей, ее использование требует дополнительного обучения.

Позитронно-эмиссионная томография. ПЭТ относится к методам функциональной визуализации, предоставляющим информацию о метаболической активности органов и тканей. Согласно рекомендациям ACR/EULAR, применение ПЭТ в совокупности с данными структурной визуализации обосновано в качестве метода оценки активности воспаления, а также у пациентов с атипичными клиническими проявлениями. Рекомендовано использование совмещенных с КТ установок, радиофармпрепарат (РФП) выбора — ^{18}F -ФДГ [8, 30].

Диагностическая ценность. Метаанализ L. Вагга и соавт. (2018) показал, что объединенная чувствительность и специфичность ПЭТ-КТ для оценки активности заболевания по сравнению с клинической оценкой составляют 81% и 74% соответственно [10]. Более поздние исследования демонстрируют, что ПЭТ-КТ способна хорошо дифференцировать активное воспаление и клиническую ремиссию: в обзоре T. Katakura и соавт. (2025) обобщены данные, где чувствительность метода для выявления активности заболевания при использовании визуальных и полуколичественных критериев достигает 87%, а специфичность — 75% [31].

Практический протокол. Подготовка к исследованию включает: голод не менее 6 часов, контроль уровня глюкозы перед введением РФП (предпочтительно менее 7 ммоль/л), по возможности выполнение исследования до начала или в ранние сроки после начала терапии; у детей — строгий учет массы тела при расчете дозы. Интервал между инфузией РФП и получением изображения должен быть не менее 60 мин, предпочтительно 90–120 мин. Зона сканирования: от основания черепа до колен, с обязательным включением всей аорты и магист-

ральных ветвей (подключичные, сонные, почечные, подвздошные артерии). При необходимости протокол расширяют с захватом всех верхних/нижних конечностей [31, 32].

Лучевые паттерны. ПЭТ-КТ выявляет линейное или сегментарное повышенное накопление ^{18}F -ФДГ по ходу аорты и ее крупных ветвей, соответствующее воспалительным изменениям стенки в активной фазе. Типично протяженное, относительно равномерное утолщение стенки аорты с интенсивностью накопления выше активности печени, с вовлечением аорты, сонных, почечных и подвздошных артерий [30, 31]. В рутинной практике применяют визуальную градацию интенсивности накопления (по отношению к печени/кровяному пулу), максимальное стандартное значение поглощения (SUVmax) и интегральную оценку сосудистой активности по данным ПЭТ (PETVAS). В исследовании Z.-H. Luo и соавт. (2024) определены пороговые значения показателей SUVmax и PETVAS сосудистой стенки у пациентов с активным воспалением ($6,3 \pm 2,7$ и $22,7 \pm 11,2$ соответственно) и у пациентов в ремиссии ($1,7 \pm 0,9$ и $3,5 \pm 5,5$ соответственно), и показано, что эти параметры коррелируют с клиническими шкалами активности. Авторы приходят к выводу о 100% чувствительности и специфичности пороговых значений SUVmax и PETVAS в оценке активности заболевания [32].

Признаки НАТ по данным ПЭТ-КТ представлены на рис. 7.

Ограничения. Несмотря на высокую чувствительность к активному воспалению, ПЭТ-КТ имеет ряд важных ограничений. Повышенное накопление ^{18}F -ФДГ в сосудистой стенке может наблюдаться при атеросклерозе, инфекционных и неопластических процессах, а также при репаративном фиброзе; это особенно актуально при обследовании пациентов старшего возраста. Также отмечено, что ^{18}F -ФДГ-позитивные участки могут не совпадать по протяженности с зонами стенозов и аневризм на МРТ и КТ [31]. Отмечается ограниченная пространственная разрешающая способность в отношении мелких ветвей и периферических сосудов, а также вариабельность полуколичественных показателей между сканерами различных производителей, требующая дальнейшей стандартизации протоколов и пороговых значений (SUV, PETVAS). При этом ПЭТ-КТ остается малодоступной и сопряженной с высокой дозовой нагрузкой процедурой, что ограничивает ее применение в педиатрии и в качестве метода динамического наблюдения.

Цифровая субтракционная ангиография. Аналоговая, а затем цифровая субтракционная ангиография, имея чувствительность и специфичность порядка 100%, долгое время оставалась «золотым стандартом» для оценки сосудистых изменений при НАТ и легла в основу ангиографических классификаций, наиболее известная из которых

Numano, применяемая и по сей день [6]. Классические работы описывали применение ЦСА для визуализации артериальных стенозов и окклюзий, оценки коллатерального кровообращения и визуализации аневризм [33, 34].

ный, у части пациентов — лучевой), обзорную аортографию (дуга аорты и ветви, затем грудная и брюшная аорта) с переходом к селективной катеризации пораженных бассейнов (сонные, позвоночные, подключичные, почечные, чревный ствол,

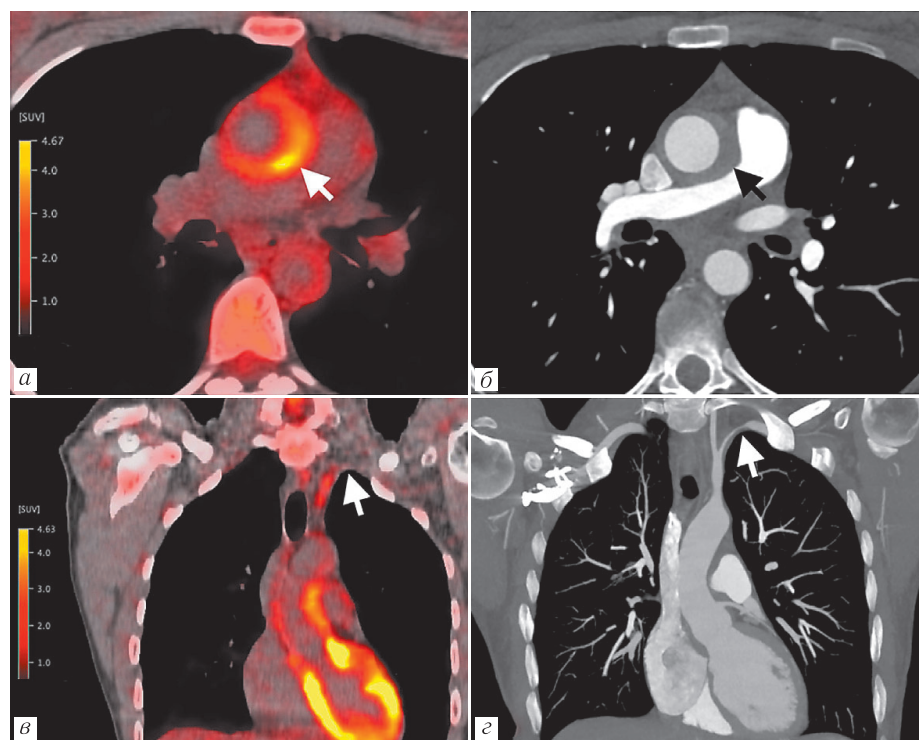


Рис. 7. ^{18}F -ФДГ ПЭТ-КТ и КТА 35-летней пациентки с длительным анамнезом НАТ: *а* — ПЭТ-КТ, аксиальный срез на уровне нисходящей аорты; *б* — КТА, венозная фаза, аксиальный срез на том же уровне; *в* — ПЭТ-КТ, корональный срез на уровне подключичных артерий; *г* — КТА, венозная фаза, аксиальный срез на том же уровне. Отмечается интенсивное поглощение РФП стенкой аорты (*а*, стрелка), соответствующее полуциркулярному утолщению стенки на КТ (*б*, стрелка), что свидетельствует об активности воспаления. При этом корональное изображение ПЭТ-КТ демонстрирует незначительное поглощение РФП левой подключичной артерией (*в*, стрелка), что соответствует значительному утолщению стенки и сужению просвета сосуда (*г*, стрелка) — признакам длительно текущего воспалительного процесса [11]

Fig. 7. ^{18}F -FDG PET-CT and CTA of a 35-year-old female patient with a long history of NTA: *a* — PET-CT, axial section at the level of the descending aorta; *b* — CTA, venous phase, axial section at the same level; *v* — PET-CT, coronal section at the level of the subclavian arteries; *g* — CTA, venous phase, axial section at the same level. There is intense radiopharmaceutical uptake by the aortic wall (*a*, arrow), corresponding to the semicircular wall thickening on CT (*b*, arrow), indicating active inflammation. At the same time, the coronal PET-CT image demonstrates insignificant radiopharmaceutical uptake by the left subclavian artery (*v*, arrow), which corresponds to significant wall thickening and narrowing of the vessel lumen (*g*, arrow) — signs of a long-term inflammatory process [11]

Согласно консенсусу ACR/EULAR, ЦСА не является методом выбора и не входит в методы первой линии диагностики, а рассматривается как резервный, инвазивный инструмент для решения ограниченного числа клинических задач: проведение эндоваскулярной реваскуляризации (баллонная ангиопластика или стентирование аорты, почечных, висцеральных, сонных, подключичных и подвздошных артерий), измерение градиентов давления при критических стенозах, когда данные КТА/МРА и клиническая картина расходятся, или в редких ситуациях, когда данных неинвазивной визуализации недостаточно (например, при сочетании НАТ с другими артериопатиями) [8].

Практический протокол. Типичный протокол ЦСА включает артериальный доступ (чаще бедрен-

верхняя и нижняя брыжеечные, общие и внутренние подвздошные артерии, при необходимости — легочная артерия). Производится выполнение серий с цифровой субтракцией в нескольких стандартных проекциях, с ограничением числа серий, объема контраста и экспозиции. При интервенционных вмешательствах также выполняется проведение внутрисосудистой манометрии для оценки градиента давления до и после дилатации, документирование результата [33, 34]. В педиатрической практике подчеркивается необходимость строгого отбора пациентов на ЦСА, применения низкодозовых протоколов, тщательного мониторинга контрастной нагрузки и обязательного наличия опыта у команды хирургов, работающей с детским НАТ [35].

Таблица
Table

Сравнительная характеристика методов диагностики болезни Такаюсу и показаний к их применению

Comparative characteristics of diagnostic methods for Takayasu's disease and indications for use

Метод	Преимущества	Ограничения	Диагностические паттерны	Показания к применению
МРТ/МРА	Хорошая визуализация просвета артерий. Возможность оценки сосудистой стенки (толщина, наличие отека, накопление парамагнетика). Высокая чувствительность в оценке воспаления. Отсутствие лучевой нагрузки	Не позволяет визуализировать мелкие сосуды. Тенденция к переоценке степени стеноза. Относительно высокая стоимость исследования	Циркулярное утолщение стенок аорты/магистральных артерий. Отек стенки на T2-ВИ. Ограничение диффузии стенкой при активном воспалении. Контрастное усиление на T1-ВИ. Изменение просвета сосуда (стенозы/окклюзии/аневризмы)	Предпочтительная стартовая модальность
КТ/КТА, ДЭКТ	Наилучшее пространственное разрешение. Хорошая визуализация просвета артерий. Возможность оценки сосудистой стенки (толщина, структура)	Неоднозначные данные относительно оценки активности заболевания. Высокая лучевая нагрузка. Высокое дозировки контрастного препарата	Циркулярное утолщение стенок аорты/магистральных артерий. Контрастное усиление на венозную фазу. Знак «двойного кольца» в венозную фазу. Кальцинаты в стенке. Изменение просвета сосуда (стенозы/окклюзии/аневризмы)	Равноценная альтернатива МРТ/МРА. Предоперационное планирование. ДЭКТ расширяет возможности традиционной КТ
УЗИ/ДС, КУ-УЗИ	Превосходная визуализация сосудистой стенки и просвета сосуда. Отсутствие лучевой нагрузки. Неинвазивность. Относительно низкая стоимость исследования	Оператор-зависимый метод. Неудовлетворительная визуализация аорты и проксимальных отделов ее ветвей. Низкая чувствительность в оценке воспаления	Однородное циркулярное утолщение стенок, с ровным внутренним контуром — «pachagopi sign». Изменение просвета сосуда (стенозы, окклюзии, аневризмы). Повышение пиковых систолических скоростей, постстенотическая турбулентность, изменение спектра кровотока. Контрастирование сосудистой стенки при КУ-УЗИ	Альтернативный метод первичной диагностики при вовлечении в процесс брахиоцефальных, подключичных, почечных артерий. Ведущий инструмент долгосрочного мониторинга. КУ-УЗИ расширяет возможности метода
ПЭТ-КТ с ¹⁸ F-ФДГ	Превосходная чувствительность в оценке активности воспаления.	Высокая лучевая нагрузка. Относительно высокая стоимость исследования. Низкая доступность	Линейное или сегментарное повышение накопления ¹⁸ F-ФДГ выше пороговых значений (SUV, PETVAS) по ходу аорты и ее крупных ветвей, соответствующее воспалению стенки	Дополнительный метод диагностики. Прямая оценка активности заболевания
ЦСА	Превосходная визуализация просвета артерий. Исследование в режиме реального времени. Возможно одномоментное проведение терапевтического вмешательства	Инвазивность. Высокая лучевая нагрузка. Высокие дозировки контрастного препарата. Низкая чувствительность в оценке ранних изменений сосудистой стенки и оценке активности заболевания	Изменение просвета сосуда (стенозы, окклюзии, аневризмы, постстенотические дилатации, неровность контуров). Редукция калибра дистального русла, развитые коллатеральные сети	Не рекомендована в качестве метода рутинной диагностики. Навигационный инструмент при эндоваскулярных вмешательствах

Лучевые паттерны. На ЦСА выявляются типичные для НАТ морфологические изменения просвета магистральных артерий: протяженные, нередко многоуровневые стенозы и окклюзии аорты и ее крупных ветвей; постстенотические дилатации и сегментарные или веретенообразные аневризмы; неровность контуров, уменьшение редукция калибра дистального русла; развитые коллатеральные сети; при вовлечении легочных артерий — сегментарные и субсегментарные стенозы/окклюзии с соответствующей редукцией периферического сосудистого рисунка [33, 34].

Ограничения. ЦСА является инвазивной процедурой, требующей седации или общей анестезии у детей, сопряжена с высокой лучевой и контрастной нагрузкой, несет риски сосудистых осложнений (диссекция, тромбоз в месте пункции, эмболия), особенно у детей и у пациентов с уже измененной сосудистой стенкой. Помимо этого, метод практически не дает информации о состоянии стенки сосуда и периаортальных структур, демонстрируя только просвет сосуда, поэтому ранняя престенотическая стадия НАТ с утолщением и отеком стенки может не визуализироваться при ЦСА. Помимо этого, метод не позволяет надежно дифференцировать активное воспаление стенки от фиброзно-рубцового ремоделирования [36].

На основании вышеизложенного в таблице представлена сравнительная характеристика методов диагностики НАТ и показаний к их применению в соответствии с актуальными рекомендациями ACR/EULAR-2022.

Следует отметить, что с практической точки зрения выбор стартовой модальности диагностики и мониторинга заболевания зачастую определяется клинической задачей и доступностью методики в конкретном учреждении.

Выводы. Неспецифический аортоартериит Такаясу — хронический аутоиммунный васкулит

с тяжелыми системными осложнениями. Специфических лабораторных маркеров заболевания не существует, его проявления на ранней стадии неспецифичны или практически отсутствуют.

Современные методы визуализации играют ключевую роль в диагностике и мониторинге лечения болезни Такаясу.

Согласно современным рекомендациям, методом первой линии диагностики является МРТ/МРА. Равноценной альтернативой служит КТ/КТА, имеющая преимущества на поздней стадии заболевания и при предоперационном планировании. УЗИ служит альтернативным методом первичной диагностики при вовлечении брахиоцефальных артерий и висцеральных ветвей аорты, а также ведущим инструментом долгосрочного мониторинга. Применение новых методик, таких как ДЭКТ и КУ-УЗИ, расширяет возможности методов.

Стандартизация критериев активности заболевания по данным методов структурной визуализации остается предметом исследований. ПЭТ-КТ позволяет производить прямую оценку активности болезни Такаясу.

ЦСА в настоящее время не рекомендована в качестве метода рутинной диагностики, может применяться в качестве навигационного инструмента при эндоваскулярных вмешательствах.

Заключение. Использование каждого из описанных в настоящем обзоре методов в соответствии с решаемой клинической задачей вносит значимый вклад в комплексную диагностику заболевания, что позволяет выработать оптимальную тактику лечения, направленную на снижение рисков осложнений и улучшение качества жизни пациентов.

Разработка и внедрение новых перспективных методик визуализации, их клиническая апробация говорят о неугасающем интересе к проблеме диагностики и лечения болезни Такаясу.

Сведения об авторах:

Постаногов Роман Анатольевич — ассистент кафедры современных методов диагностики и радиолучевой терапии имени профессора С. А. Рейнберга федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 194100, Санкт-Петербург, Литовская ул., д. 2; врач-рентгенолог рентгеновского отделения Санкт-Петербургского государственного бюджетного учреждения здравоохранения «Городская больница Святой преподобномученицы Елизаветы»; 195257, Санкт-Петербург, ул. Вавиловых, д. 14, лит. А; e-mail: r.a.postanogov@yandex.ru; ORCID 0000-0002-0523-9411;

Марченко Наталья Викторовна — доктор медицинских наук, доцент кафедры лучевой диагностики Медицинского института федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»; 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7–9; e-mail: gmv2006@mail.ru; ORCID 0000-0002-2684-9980;

Малеков Дамир Асиятович — врач-рентгенолог, заведующий отделением функциональных и лучевых методов диагностики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 194100, Санкт-Петербург, Литовская ул., д. 2; e-mail: d.a.malekov@gmail.com; ORCID 0000-0002-1358-4725;

Виниченко Софья Владимировна — ординатор федерального государственного бюджетного учреждения «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт фтизиопульмонологии» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 191036, Санкт-Петербург, Лиговский пр., д. 2–4; e-mail: sonya462001@mail.ru; ORCID 0009-0000-8032-458X;

Кудрявцева Екатерина Владимировна — ординатор частного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский медико-социальный институт»; 195271, Санкт-Петербург, Кондратьевский пр., д. 72, лит. А; e-mail: kate.kudryavceva@mail.ru; ORCID 0009-0007-1026-0737.

Information about the authors:

Roman A. Postanogov — Assistant, Department of Modern Diagnostic Methods and Radiotherapy named after Professor S.A. Reinberg, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «St. Petersburg State Pediatric Medical University» of the Ministry of Health of the Russian Federation; 194100, St. Petersburg, Litovskaya St., 2; Radiologist, X-ray Department, St. Petersburg State Budgetary Healthcare Institution «Elizavetinskaya City Hospital», 195257, St. Petersburg, Vavilovskiy St., 14, litera A; e-mail: r.a.postanogov@yandex.ru; ORCID 0000-0002-0523-9411;

Natalya V. Marchenko — Dr. of Sci. (Med.), Associate Professor of the Department of Radiation Diagnostics, Medical Institute of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education, St. Petersburg State University; 199034, St. Petersburg, Universitetskaya Embankment, 7–9; e-mail: gmv2006@mail.ru; ORCID 0000-0002-2684-9980;

Damir A. Malekov — Radiologist, Head of the Department of Functional and Radiation Diagnostic Methods, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education, St. Petersburg State Pediatric Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation; 194100, St. Petersburg, Litovskaya St., 2; e-mail: d.a.malekov@gmail.com; ORCID 0000-0002-1358-4725;

Sofia V. Vinichenko — Resident, Federal State Budgetary Institution «St. Petersburg Research Institute of Phthisiopulmonology» of the Ministry of Health of the Russian Federation; 191036, St. Petersburg, Ligovsky Prospekt, 2–4; e-mail: sonya462001@mail.ru; ORCID 0009-0000-8032-458X;

Ekaterina V. Kudryavtseva — Resident, Private Educational Institution of Higher Education «St. Petersburg Medical and Social Institute»; 195271, St. Petersburg, Kondratyevsky Prospekt, 72, lit. A; e-mail: kate.kudryavtseva@mail.ru; ORCID 0009-0007-1026-0737.

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства, согласно международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распределен следующим образом: концепция и план исследования — *Р.А. Постаногов, Н.В. Марченко*; сбор и анализ данных — *Д.А. Малеков*; подготовка рукописи — *Р.А. Постаногов, Е.В. Кудрявцева, С.В. Виниченко*.

Author's contributions. All authors confirm their authorship according to the international ICMJE criteria (all authors made substantial contributions to the conception, research, and preparation of the article, and read and approved the final version before publication). Special contribution: *RAP, NVM* aided in the concept and plan of the study; *DAM* provided collection and analysis of data; *RAP, EVK, SVV* preparation of the manuscript.

Потенциальный конфликт интересов: авторы подтверждают отсутствие конфликта интересов, который необходимо обнародовать.

Disclosure: the authors confirm that there is no conflict of interest that needs to be made public.

Поступила/Received: 20.01.2025

Принята к печати/Accepted: 29.05.2026

Опубликована/Published: 29.06.2026

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Briggs J.A., McAdoo S.P. Systemic vasculitides: an overview // *Medicine*. 2024. Vol. 52, No. 12. P. 746–753. doi: 10.1016/j.mpmed.2024.09.002.
- Joseph G., George P.V., Pati P.K., Chandy S.T. Takayasu arteritis: JACC Focus Seminar // *J. Am. Coll. Cardiol.* 2023. Vol. 81, No. 5. P. 499–517. doi: 10.1016/j.jacc.2022.09.051.
- Bhandari S., Butt S.R.R., Ishaq A. et al. Pathophysiology, diagnosis, and management of Takayasu arteritis: a review of current advances // *Cureus*. 2023. Vol. 15, No. 7, e42667. doi: 10.7759/cureus.42667.
- Popescu I., Pintican R., Cocarla L. et al. Imaging in large vessel vasculitis — a narrative review // *J. Clin. Med.* 2024. Vol. 13, No. 21, 6364. doi: 10.3390/jcm13216364.
- Rathore U., Chandwar K., Singh K., Misra D.P. Pediatric-onset Takayasu arteritis is associated with greater risk of mortality than adult-onset Takayasu arteritis: a systematic review with meta-analysis of observational cohort studies // *Semin. Arthritis Rheum.* 2024. Vol. 65. P. 152355. doi: 10.1016/j.semarthrit.2023.152355.
- Numano F., Kobayashi Y. Takayasu arteritis — beyond pulselessness // *Intern. Med.* 1999. Vol. 38, No. 3. P. 226–232. doi: 10.2169/internalmedicine.38.226.
- Grayson P.C., Ponte C., Suppiah R. et al. 2022 ACR/EULAR classification criteria for Takayasu arteritis // *Arthritis Rheumatol.* 2022. Vol. 74, No. 11. P. 1791–1799. doi: 10.1002/art.42324.
- Dejaco C., Ramiro S., Bond M. et al. EULAR recommendations for the use of imaging in large vessel vasculitis (2023 update) // *Ann. Rheum. Dis.* 2024. Vol. 83, No. 6. P. 741–751. doi: 10.1136/ard-2023-224543.
- Ghorishi A., Alayon A., Ghaddar T., Kandah M., Amundson P.K. MR and CT angiography in the diagnosis of vasculitides // *BJR Open*. 2023. Vol. 5, No. 1. 20220020. doi: 10.1259/bjro.20220020.
- Barra L., Kanji T., Malette J., Pagnoux C. Imaging modalities for the diagnosis and disease activity assessment of Takayasu's arteritis: a systematic review and meta-analysis // *Autoimmun. Rev.* 2018. Vol. 17, No. 2. P. 175–187. doi: 10.1016/j.autrev.2017.11.021.
- Aghayev A., Weber B., Lins de Carvalho T. et al. Multimodality imaging to assess diagnosis and evaluate complications of large vessel arteritis // *J. Nucl. Cardiol.* 2024. Vol. 37. P. 101864. doi: 10.1016/j.nuclcard.2024.101864.
- Oura K., Yamaguchi-Oura M., Itabashi R., Maeda T. Vascular imaging techniques to diagnose and monitor patients with Takayasu arteritis: a review of the literature // *Diagnostics (Basel)*. 2021. Vol. 11, No. 11. P. 1993. doi: 10.3390/diagnostics11111993.
- Kono M., Shimizu Y. Vessel wall magnetic resonance imaging of Takayasu arteritis // *Circ. Rep.* 2021. Vol. 3, No. 6. P. 354–355. doi: 10.1253/circrep.CR-21-0023.
- Guo X., Liu M., Ma Z. et al. Delayed contrast-enhanced magnetic resonance imaging enables detection of pulmonary artery lesions in Takayasu's arteritis // *Quant. Imaging Med. Surg.* 2023. Vol. 13, No. 1. P. 145–159. doi: 10.21037/qims-22-130.
- Kuroiwa Y., Tai H., Yamashita A. et al. High signal intensity in arterial walls on diffusion-weighted magnetic resonance imaging in the active phase of Takayasu arteritis // *Circ. J.* 2017. Vol. 81, No. 11. P. 1747–1748. doi: 10.1253/circj.CJ-17-0079.

16. Spira D., Xenitidis T., Henes J., Horger M. MRI parametric monitoring of biological therapies in primary large vessel vasculitides: a pilot study // *Br. J. Radiol.* 2016. Vol. 89. P. 20150892. doi: 10.1259/bjr.20150892.
17. Kim S.Y., Park J.H., Chung J.W. et al. Follow-up CT evaluation of the mural changes in active Takayasu arteritis // *Korean J. Radiol.* 2007. Vol. 8, No. 4. P. 286–294. doi: 10.3348/kjr.2007.8.4.286.
18. Chen B., Wang X., Yin W. et al. Assessment of disease activity in Takayasu arteritis: a quantitative study with computed tomography angiography // *Int. J. Cardiol.* 2019. Vol. 289. P. 144–149. doi: 10.1016/j.ijcard.2019.04.086.
19. Tatsugami F., Higaki T., Nakamura Y. et al. Dual-energy CT: minimal essentials for radiologists // *Jpn. J. Radiol.* 2022. Vol. 40, No. 6. P. 547–559. doi: 10.1007/s11604-021-01233-2.
20. Vlahos I., Chung R., Nair A., Morgan R. Dual-energy CT: vascular applications // *AJR Am. J. Roentgenol.* 2012. Vol. 199, No. 5 (Suppl.). P. S87–S97. doi: 10.2214/AJR.12.9114.
21. Chen L., Pan N., Hu B. et al. Monoenergetic reconstructions and iodine density maps for visualization of coronary artery stents using 8-cm dual-layer detector spectral computed tomography: an in vitro phantom study // *Quant. Imaging Med. Surg.* 2024. Vol. 14, No. 10. P. 7671–7683. doi: 10.21037/qims-24-786.
22. Chen W., Li R., Yin K. et al. Clinical feasibility of using effective atomic number maps derived from non-contrast spectral computed tomography to identify non-calcified atherosclerotic plaques: a preliminary study // *Quant. Imaging Med. Surg.* 2022. Vol. 12, No. 4. P. 2280–2287. doi: 10.21037/qims-21-643.
23. Wang A., Li W., Huang W. et al. Dual-layer spectral computed tomography aortography using a seventy-five-percent-reduced iodine dose protocol and multiparameter spectral imaging: comparison with conventional computed tomography imaging // *Quant. Imaging Med. Surg.* 2023. Vol. 13, No. 10. P. 6456–6467. doi: 10.21037/qims-23-101.
24. Harsaker V., Jensen K., Andersen H.K. et al. Quantitative benchmarking of iodine imaging for two CT spectral imaging technologies: a phantom study // *Eur. Radiol. Exp.* 2021. Vol. 5, No. 1, 24. doi: 10.1186/s41747-021-00224-2.
25. Tomelleri A., Dejaco C., Schmidt W.A. et al. Definitions of elementary ultrasound lesions in Takayasu arteritis: a study from the OMERACT Ultrasound Working Group // *RMD Open.* 2025. Vol. 11, No. 2, e005738. doi: 10.1136/rmdopen-2025-005738.
26. Dong Y., Wang Y., Wang Y. et al. Ultrasonography and contrast-enhanced ultrasound for activity assessment in 115 patients with carotid involvement of Takayasu arteritis // *Mod. Rheumatol.* 2023. Vol. 33, No. 5. P. 1007–1015. doi: 10.1093/mr/roac107.
27. Li Z., Zheng Z., Ding J. et al. Contrast-enhanced ultrasonography for monitoring arterial inflammation in Takayasu arteritis // *J. Rheumatol.* 2019. Vol. 46, No. 6. P. 616–622. doi: 10.3899/jrheum.180701.
28. Sato W., Sato T., Iino T., Seki K., Watanabe H. Visualization of arterial wall vascularization using superb microvascular imaging in active-stage Takayasu arteritis // *Eur. Heart J. Cardiovasc. Imaging.* 2019. Vol. 20, No. 7. P. 719. doi: 10.1093/ehjci/jez285.
29. Liu F.J., Ci W.P., Cheng Y. Clinical study of carotid superb microvascular imaging in evaluating the activity of Takayasu's arteritis // *Front. Cardiovasc. Med.* 2023. Vol. 10. P. 1051862. doi: 10.3389/fcvm.2023.1051862.
30. Van der Geest K.S.M., Treglia G., Glaudemans A.W.J.M. et al. Diagnostic value of [¹⁸F]FDG-PET/CT for treatment monitoring in large vessel vasculitis: a systematic review and meta-analysis // *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging.* 2021. Vol. 48, No. 12. P. 3886–3902. doi: 10.1007/s00259-021-05362-8.
31. Katakura T., Shirai T. Positron emission tomography in Takayasu arteritis: a review including patterns of vascular involvement across modalities and regions // *J. Clin. Med.* 2025. Vol. 14, No. 9, 2939. doi: 10.3390/jcm14092939.
32. Luo Z.-H., Qi W.-L., Jin A.-F., Zeng Q.-Y. Benefits and challenges of ¹⁸F-FDG PET/CT in patients with Takayasu arteritis // *Clin. Radiol.* 2024. Vol. 79, No. 6. P. 428–435. doi: 10.1016/j.crad.2024.01.020.
33. Matsunaga N., Hayashi K., Aikawa H. et al. Digital subtraction angiography in Takayasu arteritis // *Acta Radiol.* 1987. Vol. 28, No. 3. P. 247–252. doi: 10.3109/02841858709177343.
34. Sharma S., Aggarwal S., Talwar K.K., Rajani M. Intravenous digital subtraction angiography in non-specific aorto-arteritis (Takayasu's disease) // *Br. J. Radiol.* 1989. Vol. 62, No. 734. P. 117–120. doi: 10.1259/0007-1285-62-734-117.
35. Aeschlimann F.A., Yeung R.S.M., Laxer R.M. An update on childhood-onset Takayasu arteritis // *Front. Pediatr.* 2022. Vol. 10, 872313. doi: 10.3389/fped.2022.872313.
36. Datta D., Dakshit D., Hansda S. The many faces of Takayasu arteritis with digital subtraction angiography — a case series // *IOSR J. Dent. Med. Sci.* 2021. Vol. 20, No. 12 (Ser. 7). P. 1–7. doi: 10.9790/0853-2012070107.

МЕТОДЫ РЕДАКТИРОВАНИЯ ^1H -МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ: ЛЕКЦИЯ

^{1,3}Т. А. Ахадов[✉], ^{1,2}М. В. Ублинский^{✉*}, ^{1,2}А. Н. Яковлев[✉], ¹О. В. Божко[✉]

¹Научно-исследовательский институт неотложной детской хирургии и травматологии — Клиника доктора Рошала, Москва, Россия

²Институт биохимической физики имени Н. М. Эмануэля РАН, Москва, Россия

³Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

ВВЕДЕНИЕ: Метод протонной магнитно-резонансной спектроскопии (МР-спектроскопия, МРС) позволяет определять концентрации метаболитов тканей в области интереса. Используемые в клинике импульсные последовательности МР-спектроскопии решают две главные проблемы: локализации вокселя и подавления сигнала воды. Полученные таким образом спектры являются наложением всех сигналов из области интереса, поэтому наиболее достоверно можно получить информацию только о небольшом количестве метаболитов, имеющих наибольшие концентрации. Остальные метаболиты имеют низкую концентрацию и/или имеют сложное расщепление пиков и при этом перекрыты более интенсивными сигналами. Метод выявления этих метаболитов в клинически доступных системах (<3Т) — спектральное редактирование. В данной лекции кратко представлены методы спектрального редактирования, рассмотрены методы постобработки таких спектров и основные результаты исследований с применением спектрального редактирования. Методами спектрального редактирования показано, что концентрации γ -аминомасляной кислоты, лактата, аспартата, N-ацетиласпартата и N-ацетиласпартатилглутамата, 2-гидроксиглутарата, глутатиона, глутамата изменяются при различных заболеваниях. Рассмотренные в данной лекции методы и результаты исследований позволяют клиницистам предположить и апробировать новые подходы к диагностике заболеваний центральной нервной системы.

ЦЕЛЬ: Описать методы редактирования спектра ^1H -МРС в исследованиях на людях и представить некоторые основные результаты применения этих измерений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ: Использование наиболее эффективных методов редактирования, оптимизирующих информацию в протонных спектрах головного мозга человека, — технически крайне сложный процесс. Однако применение упоминаемых в лекции методик редактирования позволяет получить уникальную и неоценимую информацию о внутриклеточных концентрациях ряда важнейших метаболитов, что, безусловно, повышает уровень понимания процессов метаболизма головного мозга в норме и при различных заболеваниях.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: J-связь, усреднение по времени эха, редактирование разности J, PRESS с постоянным временем, квантовая фильтрация, метаболиты, магнитно-резонансная спектроскопия (МРС)

* Для корреспонденции: Ублинский Максим Вадимович, e-mail: maxublinsk@mail.ru

Для цитирования: Ахадов Т.А., Ублинский М.В., Яковлев А.Н., Божко О.В. Методы редактирования ^1H -магнитно-резонансной спектроскопии: лекция // *Лучевая диагностика и терапия*. 2026. Т. 17, № 2. С. 22–30, doi: <http://doi.org/10.22328/2079-5343-2026-17-2-22-30>.

SPECTRAL EDITING IN ^1H -MAGNETIC RESONANCE SPECTROSCOPY: A LECTURE

^{1,3}Tolibdzhon A. Akhadov[✉], ^{1,2}Maxim V. Ublinskiy^{✉*}, ^{1,2}Alexey N. Yakovlev[✉], ¹Olga V. Bozhko[✉]

¹Clinical and Research Institute of Emergency Pediatric Surgery and Traumatology — Dr. Roshal's Clinic, Moscow, Russia

²N. M. Emanuel Institute of Biochemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

INTRODUCTION: Proton magnetic resonance spectroscopy (MR spectroscopy, MRS) allows determining tissue metabolite concentrations in the region of interest. Clinically used MR spectroscopy pulse sequences solve two main problems: voxel localization and water signal suppression. The spectra obtained in this way are a superposition of all signals from the region of interest, so the most reliable information can be obtained only about a small number of metabolites with the highest concentrations. The remaining metabolites have low concentrations and/or have complex peak splitting, and are overlapped by more intense signals. Spectral editing is a method for identifying these metabolites in clinically available systems (<3T). This review briefly presents spectral editing methods, discusses post-processing methods for such spectra, and discusses the main results of studies using spectral editing. Spectral

editing methods have shown that the concentrations of γ -aminobutyric acid, lactate, aspartate, N-acetylaspartate and N-acetylaspartylglutamate, 2-hydroxyglutarate, glutathione, and glutamate change in various diseases. The methods and research results considered in this review will allow clinicians to suggest and test new approaches to diagnosing diseases of the central nervous system.

OBJECTIVE: To describe methods for editing the ^1H MRS spectrum in human studies and to present some of the main results of the application of these measurements.

CONCLUSION: Using the most effective editing methods to optimize information in human brain proton spectra is a highly complex technical process. However, the application of the editing techniques discussed in this lecture allows us to obtain unique and invaluable information on the intracellular concentrations of several key metabolites, which undoubtedly enhances our understanding of brain metabolism in health and disease.

KEYWORDS: J-coupling, echo time averaging, J-difference editing, constant-time PRESS, quantum filtering, metabolites, magnetic resonance spectroscopy (MRS)

* **For correspondence:** Maxim V. Ublinsky, e-mail: maxublinsk@mail.ru

For citation: Akhadov T.A., Ublinskiy M.V., Yakovlev A.N., Bozhko O.V. Spectral editing in ^1H -magnetic resonance spectroscopy: a lecture // *Diagnostic radiology and radiotherapy*. 2025. Vol. 17, No. 2. P. 22–30. <http://doi.org/10.22328/2079-5343-2026-17-2-22-30>.

Введение. Протонная магнитно-резонансная спектроскопия (^1H -МРС) — это неинвазивный метод, позволяющий количественно определять концентрации ряда важнейших метаболитов. Сигналы, генерируемые спинами ядер элементов в различном химическом окружении, распределяются вдоль оси химического сдвига [1]. Каждое вещество имеет характерный набор подобных сигналов, который называется его спектром. Поскольку обычно в ткани большое количество метаболитов, то и суммарный спектр будет представлять собой большое скопление групп сигналов. Однако в спектре головного мозга некоторые метаболиты имеют выделяющиеся сигналы, одиночные пики (синглеты). Среди них: N-ацетиласпартат (НАА), креатинсодержащие соединения (Cr), миоинозитол (mI) и холинсодержащие соединения (Cho). Каждое из этих веществ имеет собственный метаболический путь и соответственно отражает характерную информацию: НАА — маркер нейронов, mI — глиальный маркер, Cho — метаболизм мембран, Cr — энергетический метаболизм [2].

Поскольку из-за их большой интенсивности их легче всего измерять, то существует достаточное количество работ, исследовавших концентрации этих веществ при различных заболеваниях при помощи МРС. Однако ограниченное количество исследуемых метаболитов дает неполный объем информации — решением этой проблемы является измерение других метаболитов с менее интенсивными сигналами. Малоинтенсивные сигналы перекрыты вышеупомянутыми интенсивными сигналами НАА, Cr, mI и Cho. И поэтому, чтобы измерить спектры других метаболитов, необходимо выделить их из интенсивных сигналов.

Различие сигналов протонов в разных химических группах определяется двумя основными механизмами. В первом из них различия плотности электронных орбиталей атомов водорода из-за химических связей приводит к изменению напряженности магнитного поля, что создает основной механизм отличия

частот сигналов в спектре 1,5–3 Т, который называется химическим сдвигом. С увеличением напряженности основного поля увеличивается и разность частот ядер протонов в какой-нибудь химической группе и, например, в молекуле воды, поэтому для исключения влияния основного поля используют величину химического сдвига, который не зависит от величины напряженности магнитного поля. Так как эта величина относительная по определению, её измеряют в миллионных долях (м.д.).

Второй механизм отличия сигналов связан с спин-спиновым взаимодействием между разными химическими группами. Величина взаимодействия спин-спинового взаимодействия (еще называются скалярным или J-взаимодействием, J-coupling) определяется величиной J, измеряемой в Гц и не зависящей от внешнего магнитного поля. При наличии этого взаимодействия сигналы распадается на несколько пиков. В результате некоторые метаболиты присутствуют на потенциально выявляемых уровнях (порядка 1 миллимоль, мМ), но не могут быть связаны с каким-либо отдельным явно видимым пиком в спектре *in vivo*. В настоящей лекции описан подход к решению данной проблемы, который называется методикой спектрального редактирования. Самые частые подходы редактирования спектра используют известные отношения J-связей внутри интересующих молекул, чтобы выделить их сигналы, исключив более интенсивные перекрывающиеся сигналы.

Однако следует отметить, что для измерения метаболитов с низкой концентрацией не обязательно нужно использовать методику спектрального редактирования. МР-сканеры с сверхвысокой напряженностью магнитного поля (≥ 7 Тл) обеспечивают улучшенное спектральное разделение метаболитов из-за более низкой ширины сигналов. Несмотря на их преимущества, количество подобных сверхвысокопольных сканеров мало в мире, и такие томографы отсутствуют в Российской Федерации. Поэтому существует необходимость

в применении методов спектрального редактирования в клинической и исследовательской практике. Результаты исследований в поле 7T могут использоваться для верификации полученных результатов.

Существует целый ряд метаболитов, которые можно измерить при помощи методики спектрального редактирования: аскорбиновая (Asc) и γ -аминомасляная (GABA) кислоты, лактат (Lac), аспартат (Asp), N-ацетил-аспартил-глутамат (NAAG), 2-гидроксиглутарат (2HG), глутатион (GSH), глутамат (Glu), глутамин (Gln), глицин (Gly), серин (Ser). В настоящей лекции перечислены основные методы редактирования спектра ^1H -МРС, необходимые изменения импульсных последовательностей для их реализации, а также представлены основные результаты применения этих измерений для некоторых из метаболитов.

Цель. Подробное описание методов редактирования спектра ^1H -МРС в исследованиях на людях и представление некоторых основных результатов применения этих измерений.

Методы спектрального редактирования протонной МРС. Используя широкое определение методики спектрального редактирования как «метода, упрощающего ^1H -МР-спектр», в табл. 1 представлены импульсные последовательности, результаты которых будут обсуждаться в данной лекции. Для упрощения данной лекции физические основы работы каждого метода опущены (см. соответствующие ссылки).

Применение импульсной последовательности со спектральным редактированием начинается с настрой-

Поскольку вид получаемых спектров изменяется при спектральном редактировании, возникает необходимость в дополнительных процедурах предварительной обработки спектров и другой количественной обработке. Более подробно о ней рассказано ниже. В табл. 1 кратко описана сложность дополнительной обработки спектров.

Аналитические инструменты для количественной оценки и корректировки сигнала. Для анализа отредактированных спектров зачастую необходимы дополнительные шаги предварительной обработки и специальные базисные сетки, содержащие значения метаболитов для количественной обработки [7]. Одной из первых программ, использовавших специальный протокол обработки отредактированных спектров, является ПО Gannet [9]. В целом, для обработки отредактированных спектров, в том числе и предварительной, часто используют FSL-MRS и Osprey [9, 10]. Некоторые этапы предварительной обработки есть и в программе LCmodel, которая, однако, в первую очередь ценится исследователями за свои возможности в количественном анализе [10]. Для анализа отредактированных сигналов в ряде из вышеописанных методов, в частности MQF и асимметричном PRESS, необходимы программы собственной разработки, поэтому они редко используются.

Для методов оптимизации TE Spin Echo (SE), TE-усреднения, асимметричного PRESS достаточно просто моделировать спектры (можно выполнить, например, при помощи mrs-cloud [11]). Для филь-

Таблица 1

Импульсные последовательности, применяемые при спектральном редактировании

Table 1

Pulse sequences used in spectral editing		
Метод	Применение	Преимущества и недостатки
Оптимизация TE Spin Echo (SE) [3, 4]	Не требует специальных навыков, легко применима	Легко применять, но степень выделения сигналов низкая
TE-усреднение [5]	Необходима настройка и постпроцессинг специалистом	Долгое время сбора данных, хорошее выделение сигнала
Асимметричный PRESS [6]	Возможно, необходим доступ к ограниченным настройкам	Легкий постпроцессинг, низкая степень выделения сигнала
Разностные методы J-редактирования [7]	Необходима дополнительная модификация ИП при помощи программирования, либо использование модификаций других пользователей. Применять сложно	Большое разнообразие метаболитов для исследования. Высокая достоверность измерений, отличное выделение сигнала. Сложная обработка спектров
Фильтр многоквантовой когерентности [8]	Необходима дополнительная модификация ИП при помощи программирования. Применять очень сложно	Пониженная интенсивность сигнала, отличное выделение сигнала. Нет готовых общедоступных методов обработки сигналов

ки параметров импульсной последовательности (ИП) на томографе. Разные методы требуют вмешательства различного уровня сложности: изменения нескольких параметров в протоколе ИП, изменение параметров в сервисных настройках томографа, моделирование импульсов и программирование ИП. Последний способ требует специальных навыков и знаний, что осложняет применение. Необходимые дополнительные шаги также указаны в таблице.

ра многоквантовой когерентности необходимо более сложное моделирование, учитывающие дополнительные градиенты.

В 2021 году эксперты рекомендовали использовать для количественной обработки спектральных данных методы, применяющие для аппроксимации базисные функции [12]. Однако для некоторых методов, например, MEGA, в котором целевые сигналы метаболитов не перекрыты, и спектр зачастую

имеет мало сигналов (из-за избирательного выделения отдельных линий в мультиплете), возможно использование более простого подхода аппроксимации отдельных сигналов (функции Гаусса, Лоренца и другие модели).

LCModel является самым доступным и часто используемым программным обеспечением для анализа спектроскопических данных, в том числе MEGA-редактированных, TE-усредненных, параметрически оптимизированных последовательностей. LCModel имеет автоматизированную предобработку спектров, не имеет ретроспективной коррекции частоты и зависит от предварительной информации об индивидуальных спектрах метаболитов с параметрами набора, используемого для отредактированных сигналов [13]. Показано, что предварительная обработка спектров MEGA-PRESS для измерения ГАМК другими программами с количественной обработкой в LCmodel демонстрирует лучшую достоверность полученных результатов [14].

GANNET — это специально разработанная программа для редактированных спектров с открытым

тральные сигналы которых обычно необходимо редактировать, имеют много общих характеристик: низкую или среднюю концентрацию, сигналы с таким же химическим сдвигом, как и у более интенсивных пиков в спектре (см. рисунок). Обычно их спиновые системы имеют J-связь, что позволяет отделить данные сигналы от других спектральных линий.

Аспартат (Asp), N-ацетил аспартат (NAA) и N-ацетил-аспартил-глутамат (NAAG). Аспартат, или аспарагиновая кислота — эндогенная заменимая аминокислота, участвующая в синтезе белков. Asp — возбуждающий аминокислотный нейротрансмиттер, присутствующий в концентрации приблизительно 1 мМ, который был обнаружен *in vivo* в мозге человека с помощью МР-спектроскопии [15]. На основе исследований ^1H -МРС предполагается, что уровень Asp изменяется при различных расстройствах, таких как болезнь Альцгеймера, ишемия и обсессивно-компульсивное расстройство [16]. Однако учитывая низкую концентрацию аспартата и сильное перекрытие резонансных сигналов с сигналами NAA, количественная оценка Asp путем аппроксимации базовы-

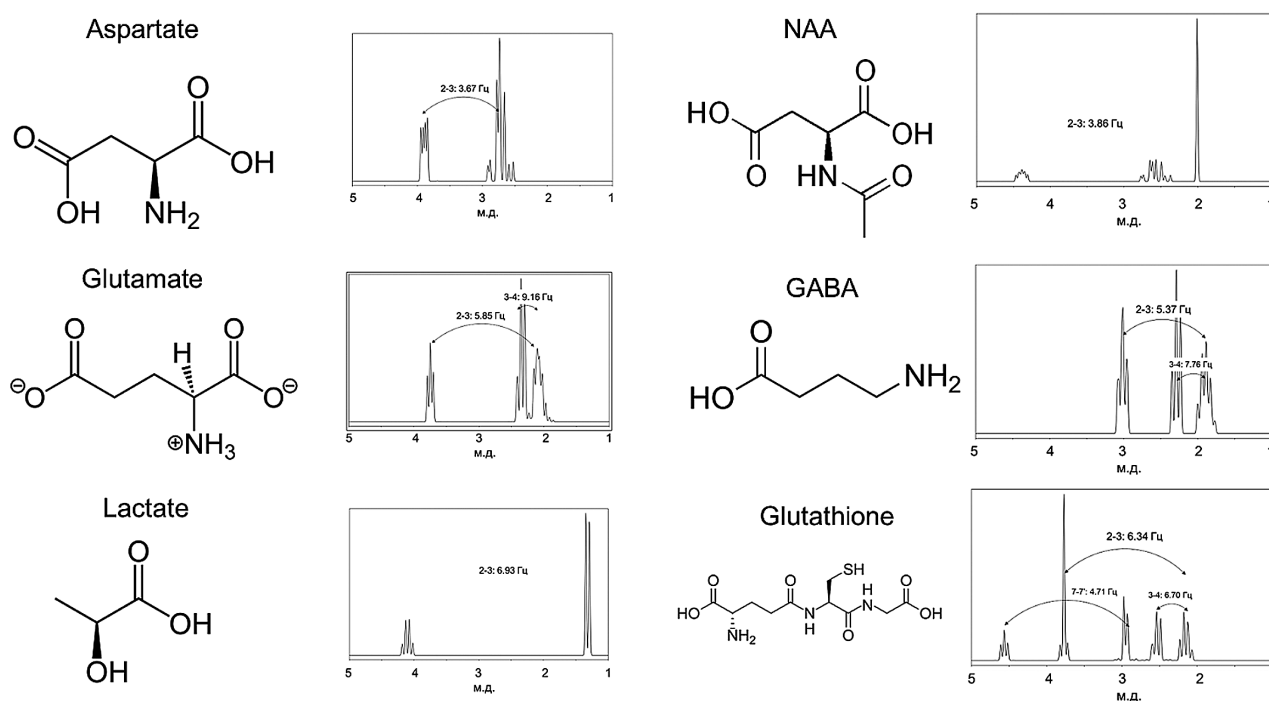


Рисунок. Молекулярная структура метаболитов (слева), которые можно оценить с помощью спектрального редактирования. Справа от каждой структуры — спектр соответствующего метаболита. Стрелками на спектре и структуре обозначены взаимодействующие сигналы и соответствующие этим сигналам протоны в структуре

Figure. Molecular structure of metabolites (left) that can be assessed using spectral editing. To the right of each structure is the spectrum of the corresponding metabolite. Arrows on the spectrum and structure indicate interacting signals and the corresponding protons in the structure

исходным кодом на основе MATLAB [9]. В ней есть готовые скрипты для обработки спектров других метаболитов: GSH, NAA, NAAG, Лас и т.д. Преимуществом Gannet является использование простой гауссовой функции для аппроксимации спектров.

Метаболиты, которые можно оценивать с помощью методики редактирования. Метаболиты, спек-

ми спектрами в обычных локализованных спектрах имеет низкую достоверность. Учитывая его роль как нейротрансмиттера и тесную метаболическую связь с циклом Кребса и другими метаболитами, более детальное измерение Asp с использованием как стандартных подходов, так и методики спектрального редактирования J-связи является одной из актуальных задач в области МР-спектроскопии [17].

N-ацетиласпартат (NAA) является второй по концентрации в головном мозге аминокислотой. NAA считается маркером нейронов, так как синтез данного метаболита происходит только в нейронах, а его катаболизм происходит в основном в олигодендроцитах. В опухолях (но не глиального) нейронного происхождения выявлено статистически значимое повышение интенсивности сигнала NAA [18]. Установлено, что концентрации NAA достоверно снижаются при легких ЧМТ, депрессии, психозе, болезни Альцгеймера [19]. NAA синтезируется в результате ацетилирования Asp. Последующее объединение NAA с глутаматом приводит к синтезу N-ацетиласпартил глутамата (NAAG). Функции NAAG включают ингибирование синаптического высвобождения GABA, глутамата и дофамина, регулирование экспрессии рецепторов GABA и снижение уровней циклического АМФ (адезинмонофосфат) [20]. В исследовании больных шизофренией была показана корреляция между уровнями NAAG в центре полушарного мозга и тяжестью симптомов; также обнаружена прямая корреляция интенсивности сигнала NAAG и возраста [21]. При расстройствах аутистического спектра наблюдается уменьшение NAAG.

Сигналы NAA и NAAG сильно пересекаются, при этом больший вклад в суммарный сигнал в спектре ^1H МРС мозга имеет NAA, из-за концентрации большей, чем NAAG [22]. Спектр магнитного резонанса ядер протона NAA состоит из сигналов метильной группы ацетила (2,04 м.д.) и протонов CH_2 и CH групп аспартата (дублет дублетов при 2,49 м.д., 2,67 м.д. и 4,38 м.д.). Благодаря высокой концентрации NAA и синглету при $\delta=2,04$ м.д., NAA можно измерить при помощи стандартных для клинической практики импульсных последовательностей (в том числе PRESS, STEAM). Однако данный сигнал содержит и сигнал NAAG, который имеет аналогичное с NAA химическое строение. Спектральное редактирование способно разделить сигналы NAA, NAAG и Asp, благодаря α -протонам аспартатной части NAAG ($\delta=4,61$ м.д.), NAA ($\delta=4,38$ м.д.) и самого Asp ($\delta=3,89$ м.д.). Они имеют J-связь с β -протонами аспартила находящимися при $\delta=2,67$ – $2,80$ м.д. ($J=3,86$ – $3,88$ Гц) [15]. Необходимые химические сдвиги для получения NAA, NAAG и Asp указаны в табл. 2 [19].

Глутамат (Glu). Глутамат — основной возбуждающий нейротрансмиттер головного мозга. Глутамат имеет несколько метаболических ролей [23], также он тесно связан с циклом трикарбоновых кислот. Синтез глутамата происходит при помощи фосфат-активированной глутаминазы (PAG) из глутамина. Уровни глутамата, как и NAA, могут характеризовать состояние нейронов. Снижение Glu часто наблюдается при дегенеративных заболеваниях. В то же время высвобождение глутамата из клеток в больших количествах является нейротоксичным. Выброс глутамата из вези-

кул в процессе нейронной активации обнаружен при зрительной [24] и тепловой стимуляции. Высокий уровень глутамата наблюдается при ряде патологических расстройств, включая боковой амиотрофический склероз, ЧМТ, психоз [25]. Понижение концентрации глутамата наблюдается при шизофрении (с повышением глутамин) [26].

Глутамат и глутамин имеют схожие химические структуры и, соответственно, схожие спектры, поэтому данные метаболиты измеряются вместе, и сумма обозначается как Glx [27]. Из-за значительного перекрытия спектральных линий глутамата и глутамин раздельный анализ данных метаболитов без использования дополнительных методов редактирования крайне затруднен. Усреднение спектров при различных ТЕ позволяет оценивать эти метаболиты отдельно друг от друга и показывает, что в сером веществе концентрация Glu более высокая, чем в белом веществе мозга [28]. Помимо ТЕ-усреднения, применение методики оптимального выбора времени эха [29] или использование асимметричной последовательности PRESS [30] также используется для выделения сигнала глутамата. Несмотря на то, что эти варианты позволяют дифференцировать глутамат и глутамин при оптимальных условиях с высококачественными данными, результативность этих методов в неоптимальных условиях в клинических исследованиях не до конца определена. Обычно редактирование специально для оценки глутамата используется относительно нечасто, потому что оценка Glx (общий глутамат + глутамин) дает хорошие результаты и воспроизводимости [31].

ГАМК (GABA). ГАМК (γ -аминомасляная кислота) — основной тормозной нейромедиатор центральной нервной системы. Из нейронов коры головного мозга около 20% являются тормозными и в большинстве из них нейромедиатором является ГАМК. Предполагается, что ГАМКергическое торможение имеет особую роль в модулировании обработки информации в коре головного мозга [32]. Высокая распространенность ГАМК в коре позволила хорошо изучить роль данного метаболита как в норме, так и при различных патологических состояниях. В исследованиях с применением функциональной магнитно-резонансной томографией (фМРТ) установлено, что ГАМК имеет обратную корреляцию с BOLD-ответом и исходной перфузией [33]. Аналогично глутамату ГАМК выбрасывается из везикул, что наблюдалось при помощи МРС в ответ на короткий зрительный стимул [34]. Изменения концентрации ГАМК, оцененные при помощи МРС, исследованы при естественном физиологическом старении [35], неврологических заболеваниях и психиатрических расстройствах [36], эпилепсии [37], ЧМТ [17], аутистических расстройствах и хронической боли [38].

ГАМК имеет три метиленовые группы, которые появляются в спектре ^1H -МРС при 3 м.д., 2,3 м.д.

и 1,9 м.д. Наиболее распространенным методом исследования ГАМК является импульсная последовательность MEGA-PRESS. Для обнаружения сигнала ГАМК при 3 м.д. ($^2\text{CH}_2$), который связан с пиком при 1,9 м.д. ($^3\text{CH}_2$), редактирующие частотно-селективные импульсы применяются (ON-серия) в область 1,7 м.д. для воздействия на спины при 1,9 м.д. для модуляции связанных с ними спинов при 3 м.д. без воздействия на перекрывающийся пик Cг. В OFF-серии импульс применяется симметрично сигналу воды в область 7,46 м.д. Затем в разностном спектре пик Cг вычитается, а сигнал GABA сохраняется [39]. У данного метода есть ограничение — совместное редактирование макромолекулярного резонанса при 1,7 м.д., поэтому метод обычно называют GABA+MM (или просто GABA+).

Для исключения вклада сигнала макромолекул используется повышение селективности импульсов редактирования (путем увеличения длительности частотно-селективного импульса (ЧСИ) и размещение редактирующего импульса OFF-серии на частоте 1,5 м.д. симметрично пику макромолекул при 1,7 м.д. Измеренный таким образом сигнал ГАМК называется GABA-. Он имеет повышенную специфичность к измерению концентрации ГАМК и меньше подвержен влиянию групповых отличий из-за отсутствия вклада MM. В ряде исследований изменения уровня ГАМК обнаружены при анализе GABA- и не обнаружены при анализе GABA+ [17, 40]. Однако сигнал GABA — менее интенсивный, в большей степени восприимчив к нестабильностям, вызванным движениями пациента и дрейфу резонансной частоты из-за узкой частотной ширины импульсов редактирования [8], поэтому необходимо с особой осторожностью применять метод подавления макромолекул.

Лактат (Lac). Лактат является продуктом анаэробного метаболизма. Поскольку основной энергетический выход происходит через аэробный путь в цикле Кребса, появление сигнала лактата в спектре головного мозга часто свидетельствует о патологических изменениях метаболических процессов. Доказано, что лактат является важным промежуточным продуктом метаболизма, в частности в головном мозге, согласно астроцитарно-нейронной лактатной гипотезе, лактат перемещается между астроцитами и нейронами для возмещения высоких энергетических потребностей нейронов [41]. При инсульте и опухолях часто детектируется увеличенный сигнал лактата из-за повышенного анаэробного метаболизма. Наличие высокого уровня лактата может быть полезным для оценки ответа на терапию. У здоровых добровольцев повышение лактата выявлено при инспираторной гипоксической нагрузке. Молекула лактата является спиновой системой AX_3 с дублетом при 1,33 м.д. и квинтетом при 4,1 м.д. Сигналы макромолекул при 1,24 м.д. и 1,43 м.д. при низкой концентрации лактата не поз-

воляют обнаружить лактат в здоровом мозге. Для выделения сигнала лактата используют импульсные последовательности с высокими временами эха, MEGA-PRESS, MQF и перенос поляризации.

2-гидроксиглутарат (2HG). Молекула 2-гидроксиглутарата структурно схожа с α -кетоглутаратом (α -KG), который является интермедиатом цикла Кребса. В здоровом мозге 2HG имеет низкую концентрацию. Мутации изоцитрат дегидрогеназы 1 и 2, характерные для глиомы 2 и 3 грейда согласно ВОЗ, приводят к образованию 2-HG [42]. В связи большой корреляцией между мутациями IDH и полным уровнем выживаемости выявление 2HG имеет прогностическое значение [6]. Таким образом, точное обнаружение 2HG *in vivo* с помощью МРС может стать неинвазивным диагностическим и прогностическим инструментом для улучшения клинического лечения пациентов с глиомами, мутировавшими в гене IDH.

Молекула 2HG имеет 5 протонов от ^2CH , $^3\text{CH}_2$ and $^4\text{CH}_2$ групп, с резонансами при 4,02, 1,83, 1,98, 2,22 и 2,27 м.д. Сигналу группы ^2CH при 1,9 м.д. связан с сигналом метилена $^3\text{CH}_2$ при 4,02 м.д., что дает возможность получать сигнал ^2HG при помощи спектрального редактирования. Для выделения сигнала ^2HG используются следующие методы — PRESS [43], редактирование J-связи резонанса 4,02 ppm [6] и двумерную корреляцию сдвига MRS [44].

Глутатион (GSH). Глутатион играет важную роль в антиоксидантных процессах, необходимых для поддержания жизни [45]. Помимо этого, GSH необходим для синтеза и деградации белков, а также для образования дезоксирибонуклеотидных предшественников ДНК. Концентрация GSH в мозге составляет порядка 2–3 мМ. Снижение концентрации GSH приводит к митохондриальной дисфункции и пониженному уровню NAA [46]. Уровень GSH обычно снижается с возрастом, а также при инсульте, шизофрении [47], депрессии [48].

GSH — это трипептид, состоящий из глутамата, цистеина и глицина [15]. По этой причине GSH имеет сложный спектр с резонансными линиями от цистеиновой части при 2,93, 2,98 и 4,56 м.д. и от глутамата при 2,15, 2,55 и 3,77 м.д., а также с пиком глицина при 3,77 м.д. В методе спектрального редактирования целями редактирования являются либо J-связь между пиками при 2,95 м.д. и 4,56 м.д. цистеиновой части, либо J-связь между сигналами при 3,77 м.д. и 2,1 м.д. глициновой части [49]. Для оценки GSH применяются методы MEGA-PRESS, переноса поляризации и многоквантовой фильтрации. В импульсной последовательности MEGA-PRESS чаще всего используются редактирующие импульсы при 4,56 м.д. и измерение пика при 2,95 ppm в разностном спектре [50]. Несмотря на то, что спектр значительно упрощается, пики NAA при 2,45 и 2,67 м.д. редактируются вместе, что усложняет количественную оценку. Исследования показали,

что более длинные времена эха 120 мс или 131 мс ведут к увеличению сигнала GSH [50].

Заключение. Различные методики МРС позволяют измерить концентрации метаболитов для исследования состояния тканей при патологических состояниях. В данной лекции мы описали методы редактирования, оптимизирующие информацию в протонных спектрах головного мозга человека, что позволяет получить данные о многих метаболитах, сигналы которых крайне трудно достоверно выде-

лить с помощью стандартных методов спектроскопии. Следует отметить, что использование наиболее эффективных методов технически крайне сложный процесс. Однако применение упоминаемых в лекции методик редактирования позволяет получить уникальную и неоценимую информацию о внутриклеточных концентрациях ряда важнейших метаболитов, что, безусловно, повышает уровень понимания процессов метаболизма головного мозга в норме и при различных заболеваниях.

Сведения об авторах:

Ахадов Толибджон Абдуллаевич — доктор медицинских наук, профессор, руководитель отдела лучевых методов диагностики государственного бюджетного учреждения здравоохранения города Москвы «Научно-исследовательский институт неотложной детской хирургии и травматологии Департамента здравоохранения города Москвы»; 127549, Москва, ул. Каргопольская ул., д. 10; e-mail: akhadov@mail.ru; ORCID 0000-0002-3235-8854;

Ублинский Максим Вадимович — кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник отдела лучевых методов диагностики государственного бюджетного учреждения здравоохранения города Москвы «Научно-исследовательский институт неотложной детской хирургии и травматологии Департамента здравоохранения города Москвы»; 119180, Москва, ул. Большая Полянка, д. 22; e-mail: maxublinsk@mail.ru; ORCID 0000-0002-4627-9874;

Яковлев Алексей Николаевич — научный сотрудник государственного бюджетного учреждения здравоохранения города Москвы «Научно-исследовательский институт неотложной детской хирургии и травматологии Департамента здравоохранения города Москвы»; 119180, Москва, ул. Большая Полянка, д. 22; e-mail: yakovlevalekcej@bk.ru; ORCID 0000-0003-1736-6503;

Божко Ольга Васильевна — кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник отдела лучевых методов диагностики государственного бюджетного учреждения здравоохранения города Москвы «Научно-исследовательский институт неотложной детской хирургии и травматологии Департамента здравоохранения города Москвы»; 119180, Москва, ул. Большая Полянка, д. 22; e-mail: bozhko_olga@mail.ru; ORCID 0000-0002-4709-9461.

Information about the authors:

Tolibdzhon A. Akhadov — Dr. of Sci. (Med.), Professor, Head of the Department of Radiation Diagnostic Methods, CRIEPST; 127549, Moscow, Kargopolskaya St., 104; e-mail: akhadov@mail.ru; ORCID 0000-0002-3235-8854;

Maxim V. Ublinsky — Cand. of Sci. (Med.), Leading Researcher, Department of Radiation Diagnostic Methods, CRIEPST; 119180, Moscow, st. Bolshaya Polyanka, 22; e-mail: maxublinsk@mail.ru; ORCID 0000-0002-4627-9874;

Alexey N. Yakovlev — Researcher, CRIEPST; 119180, Moscow, st. B. Polyanka, 22; e-mail: yakovlevalekcej@bk.ru; ORCID 0000-0001-8016-0853;

Olga V. Bozhko — Cand. of Sci. (Med.), Senior Researcher, Department of Radiation Diagnostic Methods, CRIEPST; 119180, Moscow, st. B. Polyanka, 22; e-mail: bozhko_olga@mail.ru; ORCID 0000-0002-4709-9461.

Вклад авторов: Все авторы подтверждают соответствие своего авторства согласно международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распределен следующим образом: концепция и план исследования — *Т.А. Ахадов, М.В. Ублинский*; сбор и анализ данных — *М.В. Ублинский, А.Н. Яковлев, О.В. Божко*; подготовка рукописи — *Т.А. Ахадов, М.В. Ублинский, А.Н. Яковлев, О.В. Божко*.

Authors' contributions: All authors confirm their authorship according to the international ICMJE criteria (all authors made substantial contributions to the conception, research, and preparation of the article, and read and approved the final version before publication). Special contribution: *TAA, MVU* aided in the concept and plan of the study; *MVU, ANYa, OVB* provided collection and analysis of data; *TAA, MVU, ANYa, OVB* preparation of the manuscript.

Потенциальный конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Disclosure: the author declares no conflict of interest.

Финансирование: работа проведена в рамках выполнения программы Департамента здравоохранения города Москвы по теме «Актуальные инновационные технологии диагностики значимых последствий тяжелых травм у детей на этапе ранней мультидисциплинарной диагностики».

Financing: this work was carried out as part of the Moscow Department of Health program on the theme «Current innovative technologies for diagnosing significant consequences of severe injuries in children at the stage of early multidisciplinary diagnosis».

Поступила/Received: 21.05.2025

Принята к печати/Accepted: 29.05.2026

Опубликована/Published: 29.06.2026

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Van der Graaf M. In vivo magnetic resonance spectroscopy: basic methodology and clinical applications // *Eur. Biophys. J.* 2010. Vol. 39, No. 4. P. 527–540. doi: 10.1007/s00249-009-0517-y.
2. Veeraiah P., Jansen J.F.A. Multinuclear Magnetic Resonance Spectroscopy at Ultra-High-Field: Assessing Human Cerebral Metabolism in Healthy and Diseased States // *Metabolites*. 2023. Vol. 13, No. 4. P. 577. doi: 10.3390/metabo13040577.

3. Yahya A., Mädler B., Fallone B.G. Exploiting the chemical shift displacement effect in the detection of glutamate and glutamine (Glx) with PRESS // *J. Magn. Reson.* 2008. Vol. 191, No. 1. P. 120–127. doi: 10.1016/j.jmr.2007.12.007.
4. Choi C., Ganji S.K., DeBerardinis R.J. et al. 2-hydroxyglutarate detection by magnetic resonance spectroscopy in IDH-mutated patients with gliomas // *Nat. Med.* 2012. Vol. 18, No. 4. P. 624–629. doi: 10.1038/nm.2682.
5. Hurd R., Sailasuta N., Srinivasan R. et al. Measurement of Brain Glutamate Using TE-Averaged PRESS at 3T // *Magn. Reson. Med.* 2004. Vol. 51, No. 3. P. 435–440. doi: 10.1002/mrm.20007.
6. Hancu I. Optimized Glutamate Detection at 3T // *J. Magn. Reson. Imaging.* 2009. Vol. 30, No. 5. P. 1155–1162. doi: 10.1002/jmri.21936.
7. Choi I.Y., Andronesi O.C., Barker P. et al. Spectral editing in 1H magnetic resonance spectroscopy: Experts' consensus recommendations // *NMR in Biomedicine.* 2021. Vol. 34, No. 5. e4411. doi: 10.1002/nbm.4411.
8. McLean M.A., Busza A.L., Wald L.L. et al. In vivo GABA+ measurement at 1.5T using a PRESS-localized double quantum filter // *Magn. Reson. Med.* 2002. Vol. 48. P. 233–241. doi: 10.1002/mrm.10208.
9. Edden R.A.E., Puts N.A.J., Harris A.D., Barker P.B., Evans C.J. Gannet: A batch-processing tool for the quantitative analysis of gamma-aminobutyric acid-edited MR spectroscopy spectra // *Journal of Magnetic Resonance Imaging.* 2014. Vol. 40, No. 6. P. 1445–1452. doi: 10.1002/jmri.24478.
10. Provencher S.W. Estimation of metabolite concentrations from localized in vivo proton NMR spectra // *Magnetic Resonance in Medicine.* 1993. Vol. 30, No. 6. P. 672–679. doi: 10.1002/mrm.1910300604.
11. Hui S.C.N., Saleh M.G., Zöllner H.J. et al. MRSCloud A cloud-based MRS tool for basis set simulation // *Magnetic Resonance in Medicine.* 2022. Vol. 88, No. 5. P. 1994–2004. doi: 10.1002/mrm.29370.
12. Near J., Harris A.D., Juchem C. et al. Preprocessing, analysis and quantification in single-voxel magnetic resonance spectroscopy: experts' consensus recommendations // *NMR in Biomedicine.* 2021. Vol. 34, No. 5. e4257. doi: 10.1002/nbm.4257.
13. O'Gorman R.L., Michels L., Edden R.A., Murdoch J.B., Martin E. In vivo detection of GABA and glutamate with MEGA-PRESS: reproducibility and gender effects // *J. Magn. Reson. Imaging.* 2011. Vol. 33, No. 5. P. 1262–1267. doi: 10.1002/jmri.22520.
14. Craven A.R., Bhattacharyya P.K., Clarke W.T. et al. Comparison of seven modelling algorithms for γ -aminobutyric acid-edited proton magnetic resonance spectroscopy // *NMR in Biomedicine.* 2022. Vol. 35, No. 7. e4702. doi: 10.1002/nbm.4702.
15. Govindaraju V., Young K., Maudsley A.A. Proton NMR chemical shifts and coupling constants for brain metabolites // *NMR in Biomedicine.* 2000. Vol. 13, No. 3. P. 129–153. doi: 10.1002/1099-1492(200005)13:3<129::aid-nbm619>3.0.co;2-v.
16. Klunk W.E., Xu C., Panchalingram K., McClure R.J., Pettegrew J.W. Quantitative 1H and 31P MRS of PCA extracts of postmortem Alzheimer's disease brain // *Neurobiology of Aging.* 1996. Vol. 17, No. 3. P. 349–357. doi: 10.1016/0197-4580(96)00035-8.
17. Menshchikov P.E., Semenova N.A., Akhadov T.A., Bozhko O.V., Varfolomeev S.D. An Increase in Cerebral γ -Amino Butyric Acid Concentration in Children with Mild Traumatic Brain Injury in the Acute Phase: 1H MRS Study // *Biophysics (Rus.).* 2017. Vol. 62. P. 1009–1018.
18. Nadler J.V., Cooper J.R. N-acetyl-L-aspartic acid content of human neural tumours and bovine peripheral nervous tissues // *Journal of Neurochemistry.* 1972. Vol. 19. P. 313–319. doi: 10.1111/j.1471-4159.1972.tb01341.x.
19. Menshchikov P., Ivantsova A., Manzhurtsev A. et al. Separate N-acetyl aspartyl glutamate, N-acetyl aspartate, aspartate, and glutamate quantification after pediatric mild traumatic brain injury in the acute phase // *Magn. Reson. Med.* 2020. Vol. 84, No. 6. P. 2918–2931. doi: 10.1002/mrm.28332.
20. Landim R.C.G., Edden R.A.E., Foerster B. et al. Investigation of NAA and NAAG dynamics underlying visual stimulation using MEGA-PRESS in a functional MRS experiment // *Magn. Reson. Imaging.* 2016. Vol. 34, No. 3. P. 239–245. doi: 10.1016/j.jmri.2015.10.038.
21. Rowland L.M., Kontson K., West J. et al. In vivo measurements of glutamate, GABA, and NAAG in schizophrenia // *Schizophr Bull.* 2013. Vol. 39, No. 5. P. 1096–1104. doi: 10.1093/schbul/sbs092.
22. Pouwels P.J.W., Frahm J. Differential distribution of NAA and NAAG in human brain as determined by quantitative localized proton MRS // *NMR Biomed.* 1997. Vol. 10, No. 2. P. 73–78.
23. McKenna M.C. The glutamate-glutamine cycle is not stoichiometric: Fates of glutamate in brain // *Journal of Neuroscience Research.* 2007. P. 3347–3358.
24. Yakovlev A., Manzhurtsev A., Menshchikov P. et al. Functional Magnetic Resonance Spectroscopy Study of Total Glutamate and Glutamine in the Human Visual Cortex Activated by a Short Stimulus // *Biophysics.* 2022. Vol. 67, No. 2. P. 265–273. doi: 10.1134/S0006350922020245.
25. Han J., Ma L. Study of the features of proton MR spectroscopy ((1)H-MRS) on amyotrophic lateral sclerosis // *J. Magn. Reson. Imaging.* 2010. Vol. 31, No. 2. P. 305–308. doi: 10.1002/jmri.22053.
26. Marsman A., Van Den Heuvel M.P., Klomp D.W.J. et al. Glutamate in Schizophrenia: A Focused Review and Meta-Analysis of 1H-MRS Studies // *Schizophrenia Bulletin.* 2013. Vol. 39, No. 1. P. 120–129. doi: 10.1093/schbul/sbr069.
27. Ramadan S., Lin A., Stanwell P. Glutamate and glutamine: A review of *in vivo* MRS in the human brain // *NMR in Biomedicine.* 2013. Vol. 26, No. 12. P. 1630–1646. doi: 10.1002/nbm.3045.
28. Gonenc A., Govind V., Sherif S., Maudsley A.A. Comparison of spectral fitting methods for overlapping J-coupled metabolite resonances // *Magn. Reson. Med.* 2010. Vol. 64, No. 3. P. 623–628. doi: 10.1002/mrm.22540.
29. Wijtenburg S.A., Knight-Scott J. Very short echo time improves the precision of glutamate detection at 3T in 1H magnetic resonance spectroscopy // *Journal of Magnetic Resonance Imaging.* 2011. Vol. 34, No. 3. P. 645–652. doi: 10.1002/jmri.22638.
30. Snyder J., Wilman A. Field strength dependence of PRESS timings for simultaneous detection of glutamate and glutamine from 1.5 to 7 T // *Journal of Magnetic Resonance.* 2010. Vol. 203, No. 1. P. 66–72. doi: 10.1016/j.jmr.2009.12.002.
31. Schubert F., Gallinat J., Seifert F., Rinneberg H. Glutamate concentrations in human brain using single voxel proton magnetic resonance spectroscopy at 3 Tesla // *NeuroImage.* 2004. Vol. 21, No. 4. P. 1762–1771. doi: 10.1016/j.neuroimage.2003.11.014.
32. Ferguson B.R., Gao W.-J. PV Interneurons: Critical Regulators of E/I Balance for Prefrontal Cortex-Dependent Behavior and Psychiatric Disorders // *Front Neural Circuits.* 2018. Vol. 12. P. 37. doi: 10.3389/fncir.2018.00037.

33. Donahue M.J., Rane S., Hussey E. et al. γ -Aminobutyric Acid (GABA) Concentration Inversely Correlates with Basal Perfusion in Human Occipital Lobe // *J. Cereb. Blood Flow Metab.* 2014. Vol. 34. P. 532–541.
34. Yakovlev A., Gritskova A., Manzhurtsev A. et al. Dynamics of γ -aminobutyric acid concentration in the human brain in response to short visual stimulation // *MAGMA.* 2024. Vol. 37, No. 1. P. 39–51. doi: 10.1007/s10334-023-01118-7.
35. Gao F., Edden R.A.E., Li M. et al. Edited magnetic resonance spectroscopy detects an age-related decline in brain GABA levels // *Neuroimage.* 2013. Vol. 78. P. 75–82. doi: 10.1016/j.neuroimage.2013.04.012.
36. Bollmann S., Ghisleni C., Poil S.-S. et al. Developmental changes in gamma-aminobutyric acid levels in attention-deficit/hyperactivity disorder // *Transl. Psychiatry.* 2015. Vol. 5, No. 6. e589. doi: 10.1038/tp.2015.79.
37. Simister R.J., McLean M.A., Barker G.J., Duncan J.S. Proton magnetic resonance spectroscopy of malformations of cortical development causing epilepsy // *Epilepsy Res.* 2007. Vol. 74. P. 107–115. doi: 10.1016/j.epilepsyres.2007.02.002.
38. Foerster B.R., Petrou M., Edden R.A.E. et al. Reduced insular γ -aminobutyric acid in fibromyalgia // *Arthritis Rheum.* 2012. Vol. 64, No. 2. P. 579–583. doi: 10.1002/art.33339.
39. Mullins P.G., McGonigle D.J., O’Gorman R.L. et al. Current practice in the use of MEGA-PRESS spectroscopy for the detection of GABA // *Neuroimage.* 2014. Vol. 86. P. 43–52. doi: 10.1016/j.neuroimage.2012.12.004.
40. Yakovlev A., Manzhurtsev A., Menshchikov P. et al. The Effect of Visual Stimulation on GABA and Macromolecule Levels in the Human Brain *in vivo* // *Biophysics (Russian Federation).* 2020. Vol. 65. P. 51–57.
41. Mangia S., Tkáč I., Gruetter R. et al. Sustained neuronal activation raises oxidative metabolism to a new steady-state level: Evidence from ^1H NMR spectroscopy in the human visual cortex // *Journal of Cerebral Blood Flow and Metabolism.* 2007. Vol. 27, No. 5. P. 1055–1063. doi: 10.1038/sj.jcbfm.9600401.
42. Parsons D.W., Jones S., Zhang X. et al. An Integrated Genomic Analysis of Human Glioblastoma Multiforme // *Science.* 2008. Vol. 321. P. 1807–1812. doi: 10.1126/science.1164382.
43. Pope W.B., Prins R.M., Albert Th.M. et al. Non-invasive detection of 2-hydroxyglutarate and other metabolites in IDH1 mutant glioma patients using magnetic resonance spectroscopy // *J. Neurooncol.* 2012. Vol. 107, No. 1. P. 197–205. doi: 10.1007/s11060-011-0737-8.
44. Andronesi O.C., Kim G.S., Gerstner E. et al. Detection of 2-Hydroxyglutarate in IDH-Mutated Glioma Patients by *In Vivo* Spectral-Editing and 2D Correlation Magnetic Resonance Spectroscopy // *Sci. Transl. Med.* 2012. doi: 10.1126/scitranslmed.3002693.
45. Dwivedi D., Megha K., Mishra R., Mandal P.K. Glutathione in Brain: Overview of Its Conformations, Functions, Biochemical Characteristics, Quantitation and Potential Therapeutic Role in Brain Disorders // *Neurochem. Res.* 2020. Vol. 45, No. 7. P. 1461–1480. doi: 10.1007/s11064-020-03030-1.
46. Mari M., De Gregorio E., De Dios C. et al. Mitochondrial Glutathione: Recent Insights and Role in Disease // *Antioxidants.* 2020. Vol. 9, No. 10. P. 909. doi: 10.3390/antiox9100909.
47. Emir U.E., Raatz S., McPherson S. et al. Noninvasive quantification of ascorbate and glutathione concentration in the elderly human brain // *NMR Biomed.* 2011. Vol. 2, No. 7. P. 888–894. doi: 10.1002/nbm.1646.
48. Bell C.J.M., Mehta M., Mirza L., Young A.H., Beck K. Glutathione alterations in depression: a meta-analysis and systematic review of proton magnetic resonance spectroscopy studies // *Psychopharmacology.* 2025. Vol. 242, No. 4. P. 717–724. doi: 10.1007/s00213-024-06735-1.
49. Kaiser L.G., Marjańska M., Matson G.B. et al. (^1H) MRS detection of glycine residue of reduced glutathione *in vivo* // *J. Magn. Reson.* 2010. Vol. 202, No. 2. P. 259–266. doi: 10.1016/j.jmr.2009.11.013.
50. Chan K.L., Puts N.A.J., Snoussi K. et al. Echo time optimization for J-difference editing of glutathione at 3T // *Magnetic Resonance in Med.* 2017. Vol. 77, No. 2. P. 498–504. doi: 10.1002/mrm.26122.

Открыта подписка на 2-е полугодие 2026 года.

Подписной индекс:

«Урал Пресс» (Пресса России) **014023**

УДК 616-036.8-08-06 (075)

<http://doi.org/10.22328/2079-5343-2026-17-2-31-42>

ВОЗМОЖНОСТИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В КЛАССИФИКАЦИИ ПАТОЛОГИЙ ПОЗВОНОЧНИКА НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ РАЗВИТИЯ: СИСТЕМАТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

^{1,2}К. О. Васильев[✉], ¹В. Л. Лукинов[✉], ^{1,2}В. В. Рерих[✉]

¹Новосибирский научно-исследовательский институт травматологии и ортопедии имени Я. Л. Цивьяна, г. Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный медицинский университет, г. Новосибирск, Россия

ВВЕДЕНИЕ: Большой объем информации, в том числе растущая численность населения и количество исследований значительно повышает нагрузку на врача любой специальности, в частности на врача-рентгенолога. Цифровизация исследований позволяет облегчить процессы диагностики, ведь грамотное программное обеспечение помогает специалисту быстрее обнаружить патологический процесс, а значит быстрее начать столь необходимое лечение. Одной из наиболее быстро развивающихся и важных моделей программного обеспечения для этих целей являются нейросети.

ЦЕЛЬ: Определение возможностей нейросетей в вертебрологии на современном этапе их развития в области такой функции нейросетей, как классификация.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ: При помощи протокола PRISMA был произведен поиск в базе данных Pubmed за период с января 2017 по 31 декабря 2023 г. при помощи ключевых слов.

РЕЗУЛЬТАТЫ: Для систематического обзора было отобрано 34 статьи, в которых описывалась такая функция нейросетей, как классификация.

ОБСУЖДЕНИЕ: По результатам анализа источников литературы сделаны выводы о полезности применения искусственного интеллекта на современном этапе развития в вертебрологии в такой функции, как классификация.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ: Для такой функции нейросети, как классификация, в отношении патологических изменений позвоночника не все так однозначно. В выявлении дегенеративных изменений хорошие результаты касаются в основном только центрального стеноза позвоночного канала, а результаты выявления стенозов боковых карманов и фораминальных стенозов неопределенные. Что касается переломов позвоночника, то здесь наметился абсолютный лидер — GoogleNet. За GoogleNet лидирует две сети — DCNN собственной разработки (Germann C. et al.) и комбинации многослойного перцептрона и методик 3D-радиомики (Chiari-Correia N.S. et al.). В задачи классификации опухолей позвоночника выделяется только одна сеть — ResNet 50, результаты же прочих архитектур значительно отстают и нуждаются в дальнейшей доработке.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: искусственный интеллект, нейросети, вертебрология, позвоночник, классификация

* Для корреспонденции: Васильев Константин Олегович, e-mail: vasiliev_ko@mail.ru

Для цитирования: Васильев К.О., Лукинов В.Л., Рерих В.В. Возможности искусственного интеллекта в классификации патологий позвоночника на современном этапе развития: систематический обзор // *Лучевая диагностика и терапия*. 2026. Т. 17, № 2. С. 31–42, doi: <http://doi.org/10.22328/2079-5343-2026-17-2-31-42>.

POSSIBILITIES OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN CLASSIFICATION OF SPINAL PATHOLOGIES AT THE PRESENT STAGE OF DEVELOPMENT: A SYSTEMATIC REVIEW

^{1,2}Konstantin O. Vasilyev[✉], ¹Viktor L. Lukinov[✉], ^{1,2}Vitaly V. Rerikh[✉]

¹Novosibirsk Research Institute of Traumatology and Orthopedics named after Ya. L. Tsiyvan, Novosibirsk, Russia

²Novosibirsk State Medical University, Novosibirsk, Russia

INTRODUCTION: A large amount of information, including a growing population and the number of studies significantly increases the workload of a doctor of any specialty, including a radiologist. Digitalization of research makes it possible to facilitate diagnostic processes, because competent software helps a specialist to quickly detect a pathological process, and therefore — to start much-needed treatment faster. One of the most developing and important software models for these purposes is neural networks.

OBJECTIVE: To determine the capabilities of neural networks in vertebralology at the current stage of their development in the field of such a neural network function as classification.

MATERIALS AND METHODS: Using the PRISMA protocol, a search was performed in the Pubmed database for the period from January 2017 to December 31, 2023 using keywords.

RESULTS: For the systematic review, 34 articles were selected that described such a neural network function as classification.

DISCUSSION: Based on the analysis of literature sources, conclusions were drawn about the usefulness of using artificial intelligence at the current stage of development in vertebrology in such a function as classification.

CONCLUSION: The classification function of neural networks for pathological changes in the spine is not so clear-cut. Good results in detecting degenerative changes are primarily limited to central spinal stenosis, while the results for detecting lateral recess and foraminal stenosis are inconclusive. For spinal fractures, GoogleNet has emerged as the clear leader. Two networks follow GoogleNet: a proprietary DCNN (Germann C. et al.) and a combination of a multilayer perceptron and 3D radiomics techniques (Chiari-Correia N. S. et al.). Only one network, ResNet 50, excels in the classification of spinal tumors, while the results of other architectures lag significantly behind and require further refinement.

KEYWORDS: artificial intelligence, neural networks, vertebrology, spine, classification.

* **For correspondence:** Konstantin O. Vasiliev, e-mail: vasiliev_ko@mail.ru

For citation: Vasiliev K.O., Lukinov V.L., Rerikh V.V. Possibilities of artificial intelligence in classification of spinal pathologies at the present stage of development: a systematic review // *Diagnostic radiology and radiotherapy*. 2026. Vol. 17, No. 2. P. 31–42, <http://doi.org/10.22328/2079-5343-2026-17-2-31-42>.

Введение. Большой объем информации, в том числе растущая численность населения и количество исследований значительно повышает нагрузку на врача любой специальности, в частности на врача-рентгенолога. Цифровизация исследований позволяет облегчить процессы диагностики, ведь грамотное программное обеспечение помогает специалисту быстрее обнаружить патологический процесс, а значит — быстрее начать столь необходимое лечение [1]. Также искусственный интеллект помогает снизить количество ошибок при анализе большого количества данных, стандартизировать протоколы исследований, а еще интегрироваться с системой PACS и телемедициной [2].

Нейросетевые технологии активно внедряются в лучевую диагностику, демонстрируя различную степень успешности в разных медицинских специализациях: в неврологии и нейрохирургии [3], онкологии [4], кардиологии [5], пульмонологии [6].

Несмотря на широкое применение нейросетей, вертебрология является той частью медицины, где применение высокого интеллекта не получило такого широкого распространения, как в других областях. Основными причинами являются недостаток информации ввиду сложного анатомического строения позвоночника, трудности дифференциальной диагностики некоторых патологий, дефицита базы данных, разнообразия протоколов визуализации позвоночника, недостаток цифровой грамотности, а также ограниченное количество врачей-вертебрологов [7].

Цель. Определить возможности нейросетей в вертебрологии на современном этапе их развития в области такой функции нейросетей, как классификация.

Материалы и методы. Выполнен систематический обзор источников литературы по методу PRISMA-ScR [8] за период с января 2017 по 31 декабря 2023 г. при помощи базы данных Pubmed.

Ключевые слова, по которым производился поиск в аннотации или заголовке: («deep learning» OR «neural network» OR «artificial Intelligence») AND («spine») AND («classification»). Виды лучевых методов исследования, при помощи которых проводилось обучение в описываемых в статьях: рентгенография, компьютерная томография и магнитно-резонансная томография. Ключевые слова были выбраны в связи с их вероятностью наличия в заголовке интересующих статей. После поиска по ключевым словам литературные источники были детально изучены.

Результаты. По заданным ключевым словам первоначально был отобран 201 источник литературы. Публикаций после удаления дубликатов — 103. При скрининге были исключены статьи в количестве 48 по следующим критериям: аннотации без полнотекстных статей. Далее полнотекстные статьи были оценены на приемлемость, с исключением источников, попадающих под следующие критерии: относящиеся к искусственному интеллекту, но без использования нейросетей; без использования лучевых методов диагностики; не содержащие данные о классификации; не содержащие в классификации упоминаний о следующих нозологиях: дегенеративные изменения позвоночника, травмы позвоночника, опухоли позвоночника. Итоговое количество статей, включенных в обзор — 34. Среди них 1 статья I уровня доказательности (систематический обзор: [9], остальные 33 — III и IV уровня доказательности. Этапы отбора представлены на рис. 1. Итоговое количество статей, относящихся к дегенеративным изменениям — 13, к переломам — 15, к опухолевой патологии — 6. Распределение источников литературы по нозологиям представлено на рис. 2.

Обсуждение. Классификация. Задачей классификации является определить принадлежность выявленных изменений к какому-либо классу [10].

В отношении применения нейросетей, например, к магнитно-резонансной томографии позвоночника, таким примером является бинарная классификация стеноза позвоночного канала: стеноз присутствует или стеноз отсутствует [11]. В данной ситуации используется только два класса (наличие или отсутствие), но их количество, в зависимости от поставленной задачи, может увеличиваться.

именно глубокое обучение. Методов машинного поверхностного обучения достаточно много. К ним относятся: линейный дискриминантный анализ, логистическая регрессия, наивный байсовский классификатор, метод опорных векторов, метод k-ближайших соседей, решающие деревья, в том числе случайный лес и метод градиентного бустинга [13]. К методам глубокого обучения относятся нейросети.



Рис. 1. Этапы поиска и отбора источников литературы для систематического обзора
Fig. 1. Stages of searching and selecting literature sources for a systematic review

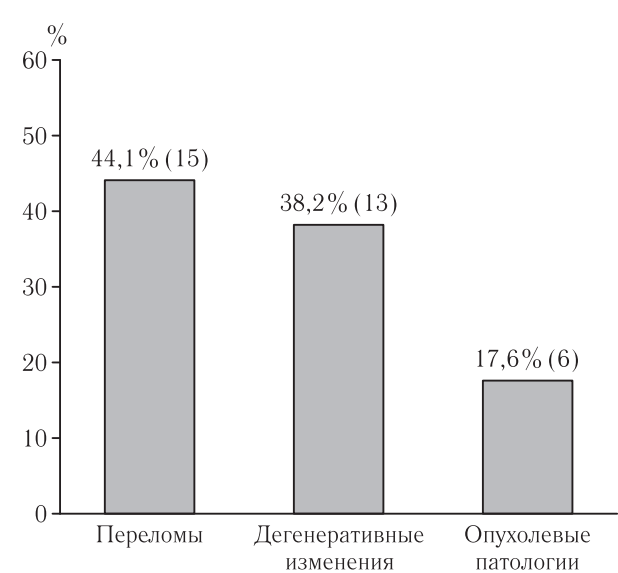


Рис. 2. Распределение источников литературы по нозологиям
Fig. 2. Distribution of literature sources by nosology

Существует множество методов классификации, но все они основаны на принципах машинного обучения. Где-то используются методы поверхностного обучения [12], но в большинстве случаев используется

Основные разделы, которые будут описаны в рамках классификации: дегенеративные изменения, переломы и опухоли. Источники литературы и анализируемые параметры представлены в таблице.

Дегенеративные изменения. Среди всего многообразия дегенеративной патологии позвоночника нейросети используется преимущественно для оценки дегенеративного стеноза позвоночного канала [14–21], но также встречаются работы по оценке дегенеративных листезов [16], грыж и протрузий [15, 17], дегенеративных изменений структуры межпозвонкового диска по Pfirrmann, снижения высоты межпозвонковых дисков, дефектов замыкательных пластинок, изменений костного мозга тел позвонков по Modic [16], остеофитов, фораминального стеноза [22]. В 12 из 13 статей использовалась модальность МРТ, в 1 из 13 упоминалась рентгенография. В 6 из 3 работ использовались комбинации нейросетей, причем в одном случае комбинация сразу из четырех нейросетей [22]. В оставшихся 5 из 13 работ использовалась одна нейросеть. Среди архитектур в 3 из 13 работ использовалась комбинация U-Net с другими сетями (где U-Net отвечает за сегментацию, а вторая сеть непосредственно за классификацию), в 6 из 13 работ Faster R-CNN и ее модификации, в 1 из 13 —

Таблица
Table

Литературные источники обнаружения и их характеристики
Literary sources of detection and their characteristics

Вид патологии	№	Год	Авторы	Используемая сеть	Вид лучевого исследования	Объем базы данных (кол-во исследований по модальности)
	2	3	4	5	6	7
Генеративные изменения	1	2017	A. Jamaludin et al. [16]	CNN: SpineNet	MPT	2009
	2	2018	Z. Han et al. [19]	Recurrent Generative Adversarial Network (RGAN)	MPT	253
	3	2018	J. T. Lu et al. [17]	U-Net+ a spine-curve fitting method +CNN	MPT	4075; — 2853 для обучения; — 611 для валидации; — 611 для внутреннего тестирования
	4	2020	Lewandrowski et al. [21]	CNN	MPT	3625; — 3560 для обучения и валидации; — 65 для внутреннего тестирования
	5	2020	D. Won et al. [18]	Faster R-CNN + VGG network	MPT	542
	6	2021	J. T. P. D. Hallinan et al. [14]	Faster R-CNN (Resnet 101) + CNN для классификации	MPT	446;
	7	2021	N. C. Lehen et al. [15]	Модифицированная U-Net-ResNet50	MPT	1646;
	8	2021	Z. Merali et al. [20]	Faster R-CNN; ResNet-50	MPT	289;
	9	2022	K. T. Gao et al. [23]	V-Net+nearest-neighbor algorithm	MPT	75
	10	2023	M. S. Ghauri et al. [22]	Комбинация 4-х нейросетей: TensorFlow, EfficientNet, ResNet-50, and PyTorch	Rg	967; — 773 для обучения; — 97 для валидации тестирования
Переломы	11	2023	W. Zhang et al. [24]	Faster-N CNN; ResNeXt101	MPT	1115
	12	2023	U. U. Bharadwaj et al. [25]	Big Transfer (BiT) ResNet-50 CNN	MPT	200; — 150 для обучения; — 20 для валидации; — 30 для тестирования
	13	2023	W. Liawrungrueang et al. [26]	CNN + YOLOv4	MPT	1000; — 800 для обучения — 200 для внутреннего тестирования
	1	2017	A. Bar et al. [31]	CNN (VGG Net)+RNN (LSTM-model).	KT	1643
	2	2018	N. Tomita [33]	CNN (ResNet34)+ LSTM	KT	1432; — 1168 для обучения; — 135 для валидации; — 129 для внутреннего тестирования
	3	2019	S. Derkach et al. [34]	Inception-ResNet-V2+DenseNet.	Rg	12 742; — 7646 для обучения; — 1274 для валидации; — 3822 для внутреннего тестирования
	4	2021	J. E. Small et al [32]	CNN	KT	665
	5	2022	A. Boonrod et al. [37]	CNN — YOLO	Rg	269; — 229 для обучения; — 40 для внутреннего тестирования

Проложение таблицы						
1	2	3	4	5	6	7
Опухоли	6	2022	X. G. Chen et al. [38]	CNN: Faster RCNN	КТ	935: — 815 для обучения; — 120 для валидации; — 198 для внутреннего тестирования
	7	2022	S. A. Doerr et al. [30]	R-CNN + Faster R-CNN	КТ	111 исследований, разбитых на отдельные изображения: — 5000 изображений для обучения; — 500 для тестирования (получены путем аугментации)
	8	2022	Q. Dong et al. [27]	CNN: GoogleNet.	Rg	15 524: — 11 876 для обучения; — 1319 для валидации; — 2329 для внутреннего тестирования
	9	2022	L.R. Yeh et al. [39]	CNN: ResNet50	MPT	190 (кросс-валидация)
	10	2022	C. Germann et al. [28]	DCNN	MPT	1056: — 834 для обучения; — 104 для валидации и внутреннего тестирования
	11	2023	J. Zhang et al. [35]	CNN: U-GCN	КТ	1217
	12	2023	Q. Dong et al. [36]	Модель, основанная на ансамблевом усреднении (ensemble algorithms): GoogleNet (Inception v1)+ + Inception-ResNet-v2+ EfficientNet-B	Rg	1896: — 847 для обучения — 307 для валидации — 742 для тестирования
	13	2023	B. Liu et al. [40]	Two-Stream Compare and Contrast Network (TSCCN) на основе CNN ResNet-18	MPT	245
	14	2023	N. S. Chiani-Correia et al. [29]	Многослойный перцептрон multilayer perceptron (MLP) с использованием методов 3D-радиомки	MPT	91
	15	2023	F. Xu et al. [41]	CNN: ResNet-18	Rg	1904; — 873 для обучения; — 292 для внутреннего тестирования; — 378 для внешней валидации; — 57 для проспективного тестирования
	1	2019	N. Lang et al. [42]	CNN+convolutional long short term memory network (CLSTM)	MPT	61
	2	2022	K. Chen et al. [43]	CNN (Multi-view Attention-Guided Network (MAGN)	MPT	217
	3	2022	J.T.P.D. Hallinan et al. [44]	CNN (ResNet 50)	MPT	247: 177 для обучения и валидации; 38 для внутреннего тестирования; 32 для внешнего тестирования
	4	2022	X. Xiong et al. [45]	CNN	MPT	107: — 75 для обучения; — 32 для валидации и внутреннего тестирования
	5	2023	J. T. Hallinan et al. [46]	ResNeXt50	КТ	463: 354 для обучения и валидации; 66 для внутреннего тестирования; 43 для внешнего тестирования
	6	2023	S. Ito et al. [47]	YOLOv4	MPT	200

Продолжение таблицы						
Вид патологии	Точность	Средняя классовая точность (average class accuracy)	Чувствительность	Специфичность	AUR ROC	Отношение рисков (hazard ratio)
I	8	9	10	11	12	13
Генеративные изменения	—	Для изменения структуры м/п дисков, снижения высоты м/п дисков, спондилолистеза, спинального стеноза, дефектов замыкательных пластинок, изменения тел позвонков по Модик: 70,1 %, 75,4 %, 95,4 %, 94,7 %, 86,7 %, 88,3 %, 89,7 %, 89,1 % соответственно	—	—	—	—
	96,2 %	—	86,0 %	89,1 %	0,983 (95 % ДИ, 0,971–0,992) для стеноза позвоночного канала и 0,961 (95 % ДИ, 0,955–0,967) для фораминального стеноза	—
	—	70,6 % для позвоночного канала и 67,1 % для межпозвонковых отверстий	—	—	0,808	0,355–0,738
	77,5–83,0 %	—	73,3 %	88,40 %	—	—
	—	—	—	Центральный канал 97,0 % (95 % ДИ, 96,0–97,8), боковой карман 96,7 % (95 % ДИ, 95,0–97,9), фораминальное отверстие 91,2 % (95 % ДИ, 85,4–95,3)	—	0,92–0,98
Грыжа диска 86,82 % (95 % ДИ, 0,84–0,89), спинальный стеноз 98,09 % (95 % ДИ, 0,97–0,99), выбухание диска 75,56 % (95 % ДИ, 0,73–0,78), компрессия корешков 90,54 % (95 % ДИ, 0,89–0,92), спондилолистез 87,61 % (0,85–0,89)	—	—	88,0 %	89 %	0,94	—
	89 %	—	67 %	89 %	0,88	—
	Внутреннее тестирование 87,70 % (95 % ДИ, 86,59–88,86 %), внешнее тестирование 74,23 % (95 % ДИ, 74,23 % (71,83–76,75 %))	—	94,12 %	96,98 %	Внутреннее тестирование 0,87 (95 % ДИ, 0,87–0,88), внешнее тестирование 0,79 (95 % ДИ, 0,76–0,81)	—
95 %						0,80 (95 % ДИ 0,76–0,82)

Продолжение таблицы

I	8	9	10	11	12	13	14
Переломы	89,10% 89,2% (95% ДИ 82,5–93,9)	—	83,90% 85,2% (95% ДИ 78,0–90,9) 87,4% (95% ДИ 86,3–88,5) 76% (95% ДИ 68,0–83,0) 80% 88,4% (95% ДИ 40,80–84,60)	93,8% 95,8% (95% ДИ 91,2–98,7) 88,4% (95% ДИ 87,4–89,4) 97% (95% ДИ 95,0–98,0) 72% (95% ДИ 68,30–98,80)		1,7 (95% ДИ 1,3–2,2)	0,77 (95% ДИ 0,74–0,79)
	86,40% Бинарная классификация — наличие или отсутствие перелома точность 95,1% Точность морфологии повреждения 86,3% Точность в отношении классификации «нет повреждения заднего связочного комплекса» и «подозрение на повреждение заднего связочного комплекса» 86,8%	—	—				0,85
	99,50% (95% ДИ 99,4–99,6)	—	—		0,99 (95% ДИ 0,98–0,99)		
	96,2% (95% ДИ 0,948–0,973)	—	94,1% (95% ДИ 0,903–0,968)	96,9% (95% ДИ 0,954–0,980)	0,945		
	—	—	54,5% (95% ДИ 47,4–61,4)	99,7% (95% ДИ 99,4–99,9)	0,948 (95% ДИ 0,926–0,968)		
	96,2% 93,3%	—	93,0% 93,3%	99,2% 93,3%	0,992 0,97		
	85,0% для внутреннего тестирования; 82,9% для проспективного тестирования	—	При проспективном тестировании 65,8% для острого перелома; 87,1% для хронического перелома; 60,0% для патологического перелома	88,9% для острого перелома; 74,4% для хронического перелома; 94,2% для патологического перелома	0,780 для острого перелома (95% ДИ 0,777–0,781), 0,836 для хронического (95% ДИ 0,834–0,838), 0,796 для патологического (95% ДИ 0,793–0,800)		
	Первой нейросети 71%, второй нейросети 81% 81,0%	—	Первой нейросети 60%, второй нейросети 75% —	Первой нейросети 76%, второй нейросети 83% —	0,78		
	—	—	97,6% для внутреннего тестирования (95% ДИ 91,7–99,7), 89,9% для внешнего (95% ДИ 84,4–94,0)	93,6% для внутреннего тестирования (95% ДИ 91,9–95,0), 98,1% для внешнего (95% ДИ 96,7–99,1)			0,92 внутреннего тестирования (95% ДИ 0,91–0,94) 0,94 для внешнего 0,94 (95% ДИ 0,92–0,96)
	81,5%	—	87,9%	79,0%			
Опухоли							

Окончание таблицы					
1	8	9	10	11	12
			Для любой степени компрес- сии внутреннее тестирова- ние 87,13 (95% ДИ 84,28–89,63), внешнее тестирование 96,45 (95% ДИ 93,58–98,29); для вы- сокой степени компрессии внутреннее тестирование 93,38 (95% ДИ 89,85–95,97), внешнее тестирование 96,61 (95% ДИ 92,77–98,75)	Для любой степени компрес- сии внутреннее тестирова- ние 95,43 (95% ДИ 94,58–96,19), внешнее тес- тирование 93,26 (95% ДИ 91,74–94,57); для высокой степени компрессии внут- реннее тестирование 95,47 (95% ДИ 94,67–96,18), внешнее тестирование 96,02 (95% ДИ 94,85–96,99)	Для любой степени компрес- сии внутреннее тестирова- ние 0,913 (95% ДИ 0,899–0,926), внешнее тестирование 0,949 (95% ДИ 0,936–0,961); для вы- сокой степени компрессии внутреннее тестирование 0,944 (95% ДИ 0,929–0,959), внешнее тестирование 0,963 (95% ДИ 0,949–0,977)
	84,1%				13
					14
					Внутреннее тестирование 0,872 (95% ДИ 0,859–0,886), внешнее тестирование 0,844 (95% ДИ 0,822–0,865)

SpineNet, в 1 из 13 — Recurrent Generative Adversarial Network, в 2 из 13 — CNN собственной разработки.

Основными метриками качества, используемыми в литературе при оценке дегенеративных изменений, являются: диагностическая точность, средняя классовая точность, чувствительность и специфичность. В трех работах также встречается площадь под ROC-кривой (AUC ROC) [20, 21] и в трех работах — каппа Gwet [14, 16, 21].

Имеются сложности для прямого сравнения эффективности описанных нейросетей в связи с непостоянством наборов метрик в различных исследованиях. Так, точность классификации в отношении стеноза позвоночного канала в двух из трех работ была на достаточно высоком уровне — 96,2% (Han Z. et al. [19]) и 98,09% (Lehnen N.C. et al. [15]). Такой параметр, как средняя классовая точность, представленный в двух работах, в отношении стеноза позвоночного канала достигает высоких показателей только у одного из авторов — 95,4% [16] с нейросетью SpineNet, в то время как у второго автора показатель данного параметра оказывается на низком уровне — 70,6% [17].

Чувствительность и специфичность описываемых сетей в классификации патологии позвоночного канала наибольшей оказалась у одного из авторов — 90,9% и 98,5% соответственно [14] с комбинации сетей Faster R-CNN (Resnet 101) + CNN. От него незначительно отстают Z. Merali и соавт. [20] (88,0% и 89,9%), Z. Han и соавт. [19] (86,00% и 89,10%) соответственно с сетями ResNet-50 и Recurrent Generative Adversarial Network.

При сравнении возможностей искусственного интеллекта и врачей [14–16, 18, 20, 23–26] практически всегда возможности нейросетей находятся на уровне врача-эксперта. Лишь в одном из исследований [15] показатели точности нейросети приближались к показателям опытного врача, но проигрывали в выявлении малозначимой патологии позвоночного канала.

Общие выводы касательно применения искусственного интеллекта в классификации дегенеративных изменений позвоночника следующие: в текущем виде алгоритмы ИИ могут использоваться для автоматического анализа и поиска патологических изменений, однако они не могут полностью заменить врача и требуют проверки находок экспертом для отсева ложноположительных результатов, особенно в случае незначительных выбуханий диска или листезов. Искусственный интеллект может выступать в роли «второго мнения», брать на себя рутинную работу по первичному анализу и сортировке снимков, что позволяет врачу сконцентрироваться на более сложных случаях.

Переломы. Возможности нейросетей в выявлении переломов позвоночника набирают популярность за исследуемые шесть лет. Для их классификации используются как комбинации нейросетей в 8 из 16

источников, так и одна нейросеть в остальных 7 из 16. В указанных работах используется большое количество архитектур: в 5 из 16 источников — это ResNet, в 2 из 16 — Faster RCNN. Все остальные уникальные архитектуры нейросетей представлены в единичном экземпляре. Лучевые модальности, используемые в литературе, представлены в следующем соотношении: рентгенография — 5 из 15, КТ — 7 из 15, МРТ — 3 из 15.

В качестве сравниваемых метрик в 13 из 15 работ используется диагностическая точность, в 10 из 15 — чувствительность и специфичность. Абсолютным лидером по точности является GoogleNet (Dong Q. [27]) с показателем 99,5%, при этом учитывается, что в качестве лучевого метода исследования использовалась классическая рентгенография. Однако, несмотря на высокую точность, показатели чувствительности оказались умеренными, что приемлемо для скринингового исследования, но часть переломов при этом все равно может быть пропущена. За GoogleNet лидируют две сети — DCNN собственной разработки (Germann C. et al. [28]) и комбинации многослойного перцептрона и методик 3D-радиомики (Chiari-Correia N.S. et al. [29]) с показателями точности в 96,2% и 93,3% соответственно. В обеих работах в качестве метода лучевой диагностики использовалась МРТ.

Возможности бинарной классификации (наличие или отсутствие перелома) всегда оказываются выше, чем при мультиклассовой (определение типа перелома) классификации. В качестве примера можно привести работу S. A. Doege и соавт. [30] с комбинацией нейросетей R-CNN + Faster R-CNN. Точность выявления перелома составляет 95,1%, но только при бинарной классификации, точность же выявления морфологии повреждения составляет 86,3%.

Существует проблема при классификации остеопоротических переломов [31–36]. В то время как нейросеть успешно справляется с обнаружением остеопоротических переломов, определение их давности — остроты или консолидации — остается для неё сложной задачей. Между тем, именно эта информация имеет критическое значение для клинициста.

При сравнении возможностей искусственного интеллекта и врачей-рентгенологов [28, 37–41] в большинстве случаев возможности нейросетей находятся на уровне опытного врача, но в одной из статей (Liu B. et al. [40]) нейросеть TSCCN, написанная на основе ResNet-18, показала объективно лучшие результаты в отношении точности и специфичности.

В целом, выводы по использованию искусственного интеллекта при переломах позвоночника следующие: авторы рекомендуют применять нейросети для классификации переломов в качестве помощника врача-рентгенолога, а именно для снижения нагрузки на врачей, проведения скрининга, приоритизации списков исследования.

Опухолевое поражение. Литературных источников по применению нейросетей для классификации

опухолей позвоночника не так много. Во всех представленных случаях [42–47] используются различные архитектуры. В $\frac{1}{6}$ работ используется комбинация нейросетей (CNN+convolutional long short term memory network (CLSTM)) [42], в остальных $\frac{5}{6}$ — одна нейросеть. В качестве сравниваемых метрик качества в $\frac{2}{6}$ статей используется диагностическая точность и в $\frac{1}{6}$ — чувствительность и специфичность, в $\frac{3}{6}$ — диагностическая точность, чувствительность и специфичность. Среди модальностей преобладает МРТ — $\frac{5}{6}$; в $\frac{1}{6}$ части работ используется КТ.

В двух статьях, выполненных одной исследовательской группой (Hallinan J.T.P.D. et al. [44, 46]) для двух модальностей (МРТ и КТ) с нейросетью ResNet 50, показатели чувствительности и специфичности были на довольно высоком уровне: 97,6% и 98,1% для МРТ и 96,45% и 93,26% для КТ. При сравнении с врачом нейросеть на МРТ и КТ показала результаты на уровне опытного врача и даже превосходила некоторых специалистов с небольшим опытом. Таким образом, основной клинический тезис двух статей заключается в том, что такая модель искусственного интеллекта может служить системой автоматического оповещения, которая повышает выявляемость опухолевого стеноза позвоночного канала на ранних этапах. В целом, описанная архитектура нейросети обладает высоким потенциалом для дальнейшего исследования и возможного применения в работе врача.

Результаты оставшихся четырех работ имеют довольно низкие метрики качества и не могут на данный момент рассматриваться в качестве применения в клинической практике.

Заключение. На основании полученных данных для такой функции нейросети, как классификация, в отношении патологических изменений позвоночника не все однозначно. В выявлении дегенеративных изменений хорошие результаты касаются в основном только центрального стеноза позвоночного канала [14–16, 19], а результаты выявления стенозов боковых карманов и фораминальных стенозов неопределенные. Что касается переломов позвоночника, то здесь наметился абсолютный лидер — GoogleNet [27]. За GoogleNet лидирует две сети — DCNN собственной разработки (Germann C. et al. [28]) и комбинации многослойного перцептрона и методик 3D-радиомики (Chiari-Correia N.S. et al. [29]). В задачи классификации опухолей позвоночника выделяется только одна сеть — ResNet 50 [44, 46], результаты же прочих архитектур значительно отстают и нуждаются в дальнейшей доработке.

Нейросети играют важную роль в классификации некоторой патологии позвоночника, позволяя автоматически анализировать медицинские изображения, такие как рентгенограммы, компьютерные и магнитно-резонансные томограммы.

По нашему мнению, при направленном развитии нейросетей вероятность их использования для классифицирования вертебральной патологии будет

выше, и потому это будет большим подспорьем в работе врача-рентгенолога в скрининге, а в дальнейшем и в более точной верификации морфологических изменений с количественной их оценкой.

Сведения об авторах:

Васильев Константин Олегович — врач-рентгенолог отделения лучевой диагностики федерального государственного бюджетного учреждения «Новосибирский научно-исследовательский институт травматологии и ортопедии имени Я.Л. Цивьяна» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 630091, Новосибирск, ул. Фрунзе, д. 17; ассистент кафедры лучевой диагностики стоматологического факультета федерального государственного бюджетного образования учреждения высшего образования «Новосибирский государственный медицинский университет»; 630091, Новосибирск, ул. Красный проспект, д. 52; e-mail: vasiliev_ko@mail.ru; ORCID 0009-0006-2726-1392;

Перих Виктор Викторович — доктор медицинских наук, врач травматолог-ортопед, начальник научно-исследовательского отделения патологии позвоночника федерального государственного бюджетного учреждения «Новосибирский научно-исследовательский институт травматологии и ортопедии имени Я.Л. Цивьяна» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 630091, Новосибирск, ул. Фрунзе, д. 17; профессор кафедры травматологии и ортопедии федерального государственного бюджетного образования учреждения высшего образования «Новосибирский государственный медицинский университет»; 630091, Новосибирск, ул. Красный проспект, д. 52; e-mail: rvv_nsk@mail.ru; ORCID 0000-0001-8545-0024;

Лукинов Виталий Леонидович — кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского отдела проектной и инновационной деятельности федерального государственного бюджетного учреждения «Новосибирский научно-исследовательский институт травматологии и ортопедии имени Я.Л. Цивьяна» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 630091, Новосибирск, ул. Фрунзе, д. 17; e-mail: vitaliy.lukinov@sccel.ru; ORCID 0000-0002-3411-508X.

Information about authors:

Konstantin O. Vasiliev — radiologist of the department of radiation diagnostics of the federal state budgetary institution «Novosibirsk Research Institute of Traumatology and Orthopedics named after Ya. L. Tsivyan» Ministry of Health of Russia; 630091, Novosibirsk, st. Frunze, 17; Assistant at the Department of Radiation Diagnostics of the Dental Faculty of the Federal State Budgetary Education Institution of Higher Education «Novosibirsk State Medical University», 630091, Novosibirsk, st. Krasny Prospekt, 52; e-mail: vasiliev_ko@mail.ru; ORCID 0009-0006-2726-1392;

Viktor V. Rerikh — Dr. of Sci. (Med.), traumatologist-orthopedist, head of the research department of spine pathology of the federal state budgetary institution Novosibirsk Research Institute of Traumatology and Orthopedics named after Ya. L. Tsivyan» Ministry of Health of Russia, 630091, Novosibirsk, st. Frunze, 17; Professor of the Department of Traumatology and Orthopedics of the Federal State Budgetary Education of the Institution of Higher Education «Novosibirsk State Medical University»; e-mail: rvv_nsk@mail.ru; ORCID 0000-0001-8545-0024;

Vitaliy L. Lukinov — Cand. of Sci. (Phys. and Math.), leading researcher of the research department of project and innovation activities of the federal state budgetary institution Novosibirsk Research Institute of Traumatology and Orthopedics named after Ya. L. Tsivyan» Ministry of Health of Russia, 630091, Novosibirsk, st. Frunze, 17; Professor of the Department of Traumatology and Orthopedics of the Federal State Budgetary Education of the Institution of Higher Education «Novosibirsk State Medical University»; e-mail: vitaliy.lukinov@sccel.ru; ORCID 0000-0002-3411-508X.

Вклад авторов: Все авторы подтверждают соответствие своего авторства, согласно международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распределен следующим образом: концепция и план исследования — *К. О. Васильев, В. В. Перих*, сбор и обработка данных — *К. О. Васильев, Л. В. Лукинов*, подготовка рукописи — *К. О. Васильев, В. В. Перих*.

Authors' contributions: All authors confirm the compliance of their authorship, according to the international criteria of the ICMJE (all authors made a significant contribution to the development of the concept, conduct of the research and preparation of the article, read and approved the final version before publication). Special contribution: concept and design of the study — *KOV, VVR*, data collection and processing — *KOV, VLL*, preparation of the manuscript — *KOV, VVR*.

Потенциальный конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Disclosure: the authors declare that they have no competing interests.

Поступила/Received: 16.10.2025

Принята к печати/Accepted: 29.05.2026

Опубликована/Published: 29.06.2026

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Jamshidi M., Rajabian M., Avery M.B. et al. A novel self-expanding primarily bioabsorbable braided flow-diverting stent for aneurysms: initial safety results // *Journal of neurointerventional surgery*. 2020. Vol. 12, No. 7. P. 700–705. doi: 10.1136/neurintsurg-2019-015555.
2. Swart N., Maroni R., Muldrew B. et al. Economic evaluation of Cytosponge®-trefoil factor 3 for Barrett esophagus: A cost-utility analysis of randomised controlled trial data // *EClinicalMedicine*. 2021. Vol. 37. doi: 10.1016/j.eclim.2021.100969.
3. Albers G.W., Marks M.P., Kemp S. et al. Thrombectomy for Stroke at 6 to 16 Hours with Selection by Perfusion Imaging: Albers G.W., Marks M.P., Kemp S. et al. // *N. Engl. J. Med.* 2018. Vol. 378. P. 708–718 // *Journal of Emergency Medicine*. 2018. Vol. 55, No. 1. P. 151. doi: 10.1056/NEJMoa1713973
4. Thong L.T., Chou H.S., Chew H.S.J., Lau Y. Diagnostic test accuracy of artificial intelligence-based imaging for lung cancer screening: A systematic review and meta-analysis // *Lung Cancer*. 2023. Vol. 176. P. 4–13. doi: 10.1016/j.lungcan.2022.12.002.
5. Gautam N., Saluja P., Malkawi A. et al. Current and future applications of artificial intelligence in coronary artery disease // *Healthcare. MDPI*. 2022. Vol. 10, No. 2. P. 232. doi: 10.3390/healthcare10020232.

6. Roberts M., Driggs D., Thorpe M. et al. Common pitfalls and recommendations for using machine learning to detect and prognosticate for COVID-19 using chest radiographs and CT scans // *Nature Machine Intelligence*. 2021. Vol. 3, No. 3. P. 199–217. doi: 10.1038/s42256-021-00307-0.
7. Wang Z., Liu X., Hu X. et al. Age-related changes in cervical sagittal alignment: based on 625 Chinese asymptomatic subjects // *European Spine Journal*. 2023. Vol. 32, No. 5. P. 1607–1615. doi: 10.1007/s00586-023-07632-5.
8. Tricco A.C., Lillie E., Zarin W., O'Brien K.K., Colquhoun H., Levac. PRISMA extension for scoping reviews (PRISMA-ScR): checklist and explanation // *Annals of internal medicine*. 2018. Vol. 169, No. 7. P. 467–473. doi: 10.7326/M18-0850.
9. Liawrungrueang W., Kim P., Kotheeranurak V., Jitpakdee K., Sarasombath. Automatic detection, classification, and grading of lumbar intervertebral disc degeneration using an artificial neural network model // *Diagnostics*. 2023. Vol. 13, No. 4. P. 663. doi: 10.3390/diagnostics13040663.
10. Mastouri R., Khelifa N., Neji H., Hantous-Zannad S. A bilinear convolutional neural network for lung nodules classification on CT images // *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*. 2021. Vol. 16. P. 91–101. doi: 10.1007/s11548-020-02283-z.
11. Merali Z., Wang J.Z., Badhiwala J.H. et al. A deep learning model for detection of cervical spinal cord compression in MRI scans // *Scientific reports*. 2021. Vol. 11, No. 1. P. 1–11. doi: 10.1038/s41598-021-89848-3.
12. Kumar K.K., Gopal T.V. A novel approach to self order feature reweighting in CBIR to reduce semantic gap using Relevance Feedback // *2014 International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies [ICCPCT-2014]*. 2014. P. 1437–1442. doi: 10.1109/ICCPCT.2014.7054919.
13. Абдуллина К.М., Спивак А.И. Применение нейронной сети архитектуры U-Net для задачи локализации нарушений целостности цифровых изображений // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2020. Т. 20, № 3. С. 425–431. [Abdullina K.M., Spivak A.I. Application of the U-Net neural network architecture for the problem of localizing integrity violations of digital images. *Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, Vol. 20, No. 3, pp. 425–431 (In Russ.)]. doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-3-425-431.
14. 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. Vol. 300, No. 1. P. 130–138. doi: 10.1148/radiol.2021204289.
15. Lehn 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. Vol. 11, No. 5. P. 902. doi: 10.3390/diagnostics11050902.
16. Jamaludin A., Lootus M., Kadir T. et al. ISSLS prize in bioengineering science 2017: Automation of reading of radiological features from magnetic resonance images (MRIs) of the lumbar spine without human intervention is comparable with an expert radiologist // *European spine journal*. 2017. Vol. 26, No. 5. P. 1374–1383. doi: 10.1007/s00586-017-4956-3.
17. Lu J. T., Pedemonte S., Bizzo B. et al. Deep Spine: Automated lumbar vertebral segmentation, disc-level designation, and spinal stenosis grading using deep learning // *Machine Learning for Healthcare Conference // PMLR*. 2018. P. 403–419. doi: 10.48550/arXiv.1807.10215.
18. 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. Vol. 45, No. 12. P. 804–812. doi: 10.1097/BRS.0000000000003377.
19. Han Z., Wei B., Leung S., Chung J., Li S. Towards automatic report generation in spine radiology using weakly supervised framework // *Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention – MICCAI*. 2018: 21st International Conference, Granada, Spain, September 16–20, 2018, Proceedings, Part IV 11. Springer International Publishing, 2018. P. 185–193. doi: 10.1007/978-3-030-00937-3_22.
20. Merali Z., Wang J.Z., Badhiwala J.H. et al. A deep learning model for detection of cervical spinal cord compression in MRI scans // *Scientific reports*. 2021. Vol. 11, No. 1. P. 1–11. doi: 10.1038/s41598-021-89848-3.
21. Lewandrowski K.U., Muraliedharan N., Eddy S.A. et al. Feasibility of deep learning algorithms for reporting in routine spine magnetic resonance imaging // *International Journal of Spine Surgery*. 2020. Vol. 14, No. s3. P. S86–S97. doi: 10.14444/7131.
22. Ghauri M.S., Reddy A.J., Tak N. et al. Utilizing deep learning for X-ray imaging: detecting and classifying degenerative spinal conditions // *Cureus*. 2023. Vol. 15, No. 7. doi: 10.7759/cureus.41582.
23. Gao K. T., Tibrewala R., Hess M., Bharadwaj U.U., Inamdar G. et al. Automatic detection and voxel-wise mapping of lumbar spine Modic changes with deep learning // *JOR spine*. 2022. Vol. 5, No. 2. P. e1204. doi: 10.1002/jsp2.1204.
24. Zhang W., Chen Z., Su Z. et al. Deep learning-based detection and classification of lumbar disc herniation on magnetic resonance images // *JOR spine*. 2023. Vol. 6, No. 3. P. e1276. doi: 10.1002/jsp2.1276.
25. Bharadwaj U.U., Christine M., Li S. et al. Deep learning for automated, interpretable classification of lumbar spinal stenosis and facet arthropathy from axial MRI // *European radiology*. 2023. Vol. 33, No. 5. P. 3435–3443. doi: 10.1007/s00330-023-09483-6.
26. Liawrungrueang W., Kim P., Kotheeranurak V., Jitpakdee K., Sarasombath P. Automatic detection, classification, and grading of lumbar intervertebral disc degeneration using an artificial neural network model // *Diagnostics*. 2023. Vol. 13, No. 4. P. 663. doi: 10.3390/diagnostics13040663.
27. Dong Q. Deep Learning Classification of Spinal Osteoporotic Compression Fractures on Radiographs using an Adaptation of the Genant Semiquantitative Criteria // *Academic radiology*. 2022. Vol. 29, No. 12. P. 1819–1832. doi: 10.1016/j.acra.2022.02.020.
28. Germann C., Meyer A. N., Staib M., Sutter R., Fritz B. Performance of a deep convolutional neural network for MRI-based vertebral body measurements and insufficiency fracture detection // *European Radiology*. 2023. Vol. 33, No. 5. P. 3188–3199. doi: 10.1007/s00330-022-09354-6.
29. Chiari-Correia N.S., Nogueira-Barbosa M.H., Chiari-Correia R.D., Azevedo-Marques P.M. A 3D radiomics-based artificial neural network model for benign versus malignant vertebral compression fracture classification in MRI // *Journal of Digital Imaging*. 2023. Vol. 36, No. 4. P. 1565–1577. doi: 10.1007/s10278-023-00847-4.
30. Doerr S. A., Weber-Levine C., Hersch A.M. et al. Automated prediction of the Thoracolumbar Injury Classification and Severity Score from CT using a novel deep learning algorithm // *Neurosurgical focus*. 2022. Vol. 52, No. 4. P. E5. doi: 10.3171/2022.1.FOCUS21745.
31. Bar A., Wolf L., Amitai O.B., Toledano E., Elnekave E. Compression fractures detection on CT // *Medical imaging 2017: computer-aided diagnosis // SPIE*. 2017. Vol. 10134. P. 1036–1043. doi: 10.1117/12.2249635.
32. Small J.E., Osler P., Paul A.B., Kunst M. CT cervical spine fracture detection using a convolutional neural network // *American Journal of Neuroradiology*. 2021. Vol. 42, No. 7. P. 1341–1347. doi: 10.3174/ajnr.A7094.

33. Tomita N., Cheung Y.Y., Hassanpour S. Deep neural networks for automatic detection of osteoporotic vertebral fractures on CT scans // *Computers in biology and medicine*. 2018. Vol. 98. P. 8–15. doi: 10.1016/j.combiomed.2018.05.011.
34. Derkach S., Kirby C., Kimelman D. et al. Identification of vertebral fractures by convolutional neural networks to predict nonvertebral and hip fractures: a registry-based cohort study of dual X-ray absorptiometry // *Radiology*. 2019. Vol. 293, No. 2. P. 405–411. doi: 10.1148/radiol.2019190201.
35. Zhang J., Liu F., Xu J. et al. Automated detection and classification of acute vertebral body fractures using a convolutional neural network on computed tomography // *Frontiers in endocrinology*. 2023. Vol. 14. P. 1132725. doi: 10.3389/fendo.2023.1132725.
36. Dong Q., Luo G., Lane N.E. et al. Generalizability of deep learning classification of spinal osteoporotic compression fractures on radiographs using an adaptation of the modified-2 algorithm-based qualitative criteria // *Academic radiology*. 2023. Vol. 30, No. 12. P. 2973–2987. doi: 10.1016/j.acra.2023.04.023.
37. Boonrod A. et al. Diagnostic accuracy of deep learning for evaluation of C-spine injury from lateral neck radiographs // *III*. 2022. Vol. 8, No. 8. doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e10372.
38. Chen X.G., Liu Y.A. classification method for thoracolumbar vertebral fractures due to basketball sports injury based on deep learning // *Computational and mathematical methods in medicine*. 2022. Vol. 2022, No. 1. P. 8747487. doi: 10.1155/2022/8747487.
39. Yeh L.R., Zhang Y., Chen J.H. et al. A deep learning-based method for the diagnosis of vertebral fractures on spine MRI: retrospective training and validation of ResNet // *European Spine Journal*. 2022. P. 1–9. doi: 10.1007/s00586-022-07121-1.
40. Liu B., Jin Y., Feng S. et al. Benign vs malignant vertebral compression fractures with MRI: a comparison between automatic deep learning network and radiologist's assessment // *European Radiology*. 2023. Vol. 33, No. 7. P. 5060–5068. doi: 10.1007/s00330-023-09713-x.
41. Xu F., Xiong Y., Ye G. et al. Deep learning-based artificial intelligence model for classification of vertebral compression fractures: A multicenter diagnostic study // *Frontiers in Endocrinology*. 2023. Vol. 14. P. 1025749. doi: 10.3389/fendo.2023.1025749.
42. Lang N., Zhang Y., Zhang E. et al. Differentiation of spinal metastases originated from lung and other cancers using radiomics and deep learning based on DCE-MRI // *Magnetic resonance imaging*. 2019. Vol. 64. P. 4. doi: 10.1016/j.mri.2019.02.013.
43. Chen K., Cao J., Zhang X. et al. Differentiation between spinal multiple myeloma and metastases originated from lung using multi-view attention-guided network // *Frontiers in Oncology*. 2022. Vol. 12. P. 981769. doi: 10.3389/fonc.2022.981769.
44. Hallinan J.T.P.D., Zhu L., Zhang W. et al. Deep learning model for classifying metastatic epidural spinal cord compression on MRI // *Frontiers in Oncology*. 2022. Vol. 12. P. 849447. doi: 10.3389/fonc.2022.849447.
45. Xiong X., Wang J., Hu S. et al. Differentiating between multiple myeloma and metastasis subtypes of lumbar vertebra lesions using machine learning-based radiomics // *Frontiers in Oncology*. 2021. Vol. 11. P. 601699. doi: 10.3389/fonc.2021.601699.
46. Hallinan J.T.P.D., Zhu L., Zhang W. et al. Deep learning assessment compared to radiologist reporting for metastatic spinal cord compression on CT // *Frontiers in Oncology*. 2023. Vol. 13. P. 1151073. doi: 10.3389/fonc.2023.1151073.
47. Ito S., Nakashima H., Segi N. et al. Automated detection and diagnosis of spinal schwannomas and meningiomas using deep learning and magnetic resonance imaging // *J. Clin. Med*. 2023. Vol. 12, No. 15. P. 5075. doi: 10.3390/jcm12155075.

Уважаемые коллеги!



Библиотека журнала «Лучевая диагностика и терапия» пополнилась руководством для врачей, которое предназначено для подготовки врачей — лучевых диагностов и врачей-клиницистов по вопросам современных подходов к получению и анализу лучевых изображений, в соответствии с критериями, принятыми в международной клинической практике, а также требованиями, предъявляемыми к формированию структурированных отчетов. Такой подход обеспечивает повышение качества выполняемых исследований, интерпретации изображений и достоверности заключений, а также способствует улучшению междисциплинарной коммуникации.

Настоящее издание является логическим продолжением руководств для врачей «Современные стандарты анализа лучевых изображений» (2017), «Современные классификации RADS и принципы построения заключения» (2018), «Современные стандарты анализа лучевых изображений и принципы построения заключения» (2019), «Современные стандарты анализа лучевых изображений и алгоритмы построения заключения» (2020–2025).

При его подготовке были использованы материалы, обсуждавшиеся на одноименной Международной ежегодной телеконференции 12 декабря 2025 г. (Санкт-Петербург).

Руководство для врачей «Современные стандарты анализа лучевых изображений и принципы построения заключения. Том IX» может использоваться для подготовки в системе последипломного и дополнительного профессионального образования, а также в системе ОМС и ДМС для контроля качества оказываемой медицинской помощи.

Приобрести книгу можно
на сайте издательства <https://www.bmosc-spb.ru>.

ОРИГИНАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ / ORIGINAL RESEARCH

УДК 616.212.2-073.43-036.12

<http://doi.org/10.22328/2079-5343-2026-17-2-43-50>

МУЛЬТИПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НОСОВОЙ ПЕРЕГОРОДКИ: ПРОСПЕКТИВНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

¹А. Р. Кормилина[✉], ²Н. С. Серова[✉], ¹М. Г. Тухбатуллин^{✉*}, ¹Р. С. Байбиков[✉]¹Казанская государственная медицинская академия, Казань, Россия²Первый Московский государственный университет (Сеченовский Университет), Москва, Россия

ВВЕДЕНИЕ: Полость носа представляет собой сложную анатомическую структуру. Перегородка носа (ПН), состоящая из хрящевых, костных элементов и слизистой оболочки, делит полость на две симметричные части, ее средняя толщина составляет около 2 мм. От 75 до 80% населения земного шара страдают от различных форм деформации носовой перегородки. Хирургические вмешательства на данной анатомической структуре являются одной из наиболее часто выполняемых оториноларингологических операций, при этом нежелательные исходы операций варьируются в пределах от 10 до 27%. Наиболее распространенными осложнениями являются перфорация перегородки, ее флотация, вторичная деформация в передних отделах, а также деформация наружного носа.

ЦЕЛЬ: Улучшение диагностики патологических состояний перегородки носа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ: Всего проведены УЗИ ПН у 128 пациентов (72 женщин и 56 мужчин в возрасте от 18 до 69 лет). В контрольную группу входили 30 субъектов без патологии ПН. В первую группу входили 52 пациента с перфорацией ПН. Вторая группа состояла из 46 пациентов с искривлениями ПН. Исследования проведены на ультразвуковых аппаратах экспертного уровня (i-800, Canon; Resona 7, Mindray) линейными датчиками частотой в диапазоне от 3 до 20 МГц. Многокомпонентное (мультипараметрическое) УЗИ включало: В-режим, режим цветового дуплексного сканирования (ЦДС), ультразвуковая эластография сдвиговой волной (УЭСВ). В серошкальном В-режиме изучали структуру, контуры, эхогенность ПН. Артериальные сосуды ПН изучали с применением режима ЦДС, определяли параметры кровотока: максимальная линейная скорость кровотока в см/сек — $V_{\max}$, минимальная линейная скорость кровотока в см/сек — $V_{\min}$, индекс резистентности сосудов — R_i в ед. Определены доминирующие артерии (ДА) в сосудистом сплетении ПН с обеих сторон, параметры кровотока в которых были максимальными по сравнению с остальными артериями. Для определения эластичности ПН (в кПа) применяли режим УЭСВ.

Статистика: анализ проводили в программном пакете SPSS версии 21.0. Оценку нормальности распределения выборок проводили с помощью критерия Колмогорова–Смирнова.

РЕЗУЛЬТАТЫ: Хрящевая часть ПН в норме визуализируется в виде однородной изоэхогенной структуры, с четкими контурами. Перфоративные отверстия ПН, различные по размерам, визуализируется в виде анэхогенных участков с четкими контурами. Средние значения $V_{\max}$ в ДА составили 26,000 (14,000–38,000) см/сек ($p < 0,001$ с обеих сторон). Медиана R_i в ДА составляла 0,5650 (0,3500–0,6900) ед. ($p < 0,001$ с обеих сторон ПН). Результаты гемодинамических показателей ДА первой группы (перфорация ПН) показали, что кровоток у 4 обследуемых значительно отличался от показателей контрольной группы. Параметры кровотока в ДА второй группы (искривления ПН) не отличались от показателей контрольной группы. В контрольной группе значения жесткости ПН составили ($\pm$ стандартное отклонение [SD]) $36,49 \pm 4,40$ кПа и эти значения показали рост по мере увеличения возраста обследуемых. Значения жесткости при перфорации хрящевой части ПН были достоверно выше таковых в норме ($43,05 \pm 3,44$ кПа; $p < 0,001$).

ОБСУЖДЕНИЕ: В серошкальном В-режиме четко удается визуализировать хрящевой отдел ПН и определить те ультразвуковые критерии, которые характерны для нормы и для патологических состояний. УЗИ позволяет четко определить размеры, контуры и локализацию перфоративного отверстия. Для нормального приживления перемещаемого эндоназального лоскута при пластических операциях на ПН большое значение имеет состоятельность сосудов, которые питают данный лоскут. ЦДС сосудов в сосудистом сплетении ПН с выделением параметров ДА позволяет прогнозировать приживляемость перемещаемых эндоназальных лоскутов. Изучение эластичности хрящевого отдела ПН достоверно показывает повышение его жесткости с возрастом. Значения жесткости повышаются при перфорации ПН ($43,05 \pm 3,44$ кПа; $p < 0,001$), что объясняется нарушением васкуляризации ПН при данной патологии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ: Мультипараметрическое УЗИ ПН позволяет достоверно получать результаты о состоянии ее хрящевого отдела, выявить деформации и дефекты перегородки, изучить параметры сосудов, участвующих в кровоснабжении ПН, эластичность ПН в норме и при патологии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: мультипараметрическое УЗИ, перегородка носа, В-режим, цветное дуплексное сканирование, ультразвуковая эластография сдвиговой волной

* Для корреспонденции: Тухбатуллин Мунир Габдулфатович, e-mail: munir.tuhbatullin@tatar.ru

Для цитирования: Кормилина А.Р., Серова Н.С., Тухбатуллин М.Г., Байбиков Р.С. Мультипараметрическое ультразвуковое исследование носовой перегородки: проспективное исследование // *Лучевая диагностика и терапия*. 2026. Т. 17, № 2. С. 43–50, doi: <http://doi.org/10.22328/2079-5343-2026-17-2-43-50>.

MULTIPARAMETRIC ULTRASOUND EXAMINATION OF THE NASAL SEPTUM: A PROSPECTIVE STUDY

¹Alsu R. Kormilina¹, ²Natalia S. Serova², ¹Munir G. Tuhbatullin^{1*}, ¹Rashit S. Baybikov¹

¹Kazan State Medical Academy, Kazan, Russia

²First Moscow State University (Sechenov University), Moscow, Russia

INTRODUCTION: The nasal cavity is a complex anatomical structure. The nasal septum (NS), consisting of cartilage, bone elements and mucous membrane, divides the cavity into two symmetrical parts, its average thickness is about 2 mm. From 75 to 80% of the world's population suffer from various forms of deformity of the NS. Surgical interventions on this anatomical structure are one of the most frequently performed otorhinolaryngological operations, while undesirable surgical outcomes vary from 10 to 27%. The most common complications are septal perforation, septal flotation, secondary anterior deformity, and external nasal deformity.

OBJECTIVE: Improving the diagnosis of pathological conditions of the nasal septum.

MATERIALS AND METHODS: A total of 128 patients (72 women and 56 men aged 18 to 69 years) were subjected to ultrasound of the NS. The control group included 30 subjects without NS pathology. The first group included 52 patients with NS perforation. The second group consisted of 46 patients with NS curvatures. The studies were carried out on expert-level ultrasound devices (i-800, Canon; Resona 7, Mindray) linear sensors with a frequency range of 3 to 20 MHz. Multicomponent (multiparameter) ultrasound included: B-mode, color duplex scanning mode (CDS), ultrasonic shear wave elastography (SWE). In the gray-scale B-mode, the structure, contours, and echogenicity of the NS were studied. The arterial vessels of the NS were studied using the CDS mode, the parameters of blood flow were determined: the maximum linear velocity of blood flow in cm/sec — $V_{\max}$, the minimum linear velocity of blood flow in cm/sec — $V_{\min}$, the index of vascular resistance — R_i in units. Dominant arteries (DA) in the vascular plexus of the NS on both sides were determined, the parameters of blood flow in which were maximum in comparison with the rest of the arteries. To determine the elasticity of the NS (in kPa), the SWE mode was used.

Statistics: analysis was carried out in the SPSS software package version 21.0. The normality of the sample distribution was assessed using the Kolmogorov-Smirnov criterion.

RESULTS: The cartilaginous part of the NS is normally visualized as a homogeneous isoechogenic structure, with clear contours. Perforated openings of the NS, different in size, are visualized as anechoic areas with clear contours. The mean $V_{\max}$ values in DA were 26,000 (14,000–38,000) cm/sec; ($p < 0.001$ on both sides). The median R_i in DA was 0.5650 (0.3500–0.6900) units; ($p < 0.001$ on both sides of the NS). The results of the hemodynamic parameters of the DA of the first group (NS perforation) showed that the blood flow in 4 subjects differed significantly from the parameters of the control group. The parameters of blood flow in the DA of the second group (NS curvature) did not differ from the parameters of the control group. The study of the elasticity of the cartilaginous part of the NS reliably shows an increase in its stiffness with age. The stiffness values increase with perforation of the NS (43.05 ± 3.44 kPa; $p < 0.001$), which is explained by impaired vascularization of the NS in this pathology.

DISCUSSION: In the grayscale B-mode, it is possible to clearly visualize the cartilaginous part of the NS and determine those ultrasound criteria that are characteristic of the norm and for pathological conditions. Ultrasound allows you to clearly determine the size, contours and localization of the perforated opening. For normal survival rate of the relocated endonasal flap during plastic surgery on NS, the parameters of the vessels that nourish this flap is important. Parameters of DA allow to predict the survival rate of the relocated endonasal flaps. The study of the elasticity of the cartilaginous part of the NS reliably shows an increase in its stiffness with age. The stiffness values increase with NS perforation (43.05 ± 3.44 kPa; $p < 0.001$), which is explained by impaired vascularization of the NS in this pathology.

CONCLUSION: Multicomponent ultrasound of the NS allows you to reliably obtain results about the state of its cartilaginous region, to identify deformities and defects of the septum, to study the parameters of the vessels involved in the blood supply of the NS, the elasticity of the NS in normal and pathological conditions.

KEYWORDS: multiparametric ultrasound, nasal septum, B-mode, color duplex scanning, ultrasonic shear wave elastography

* For correspondence: Munir G. Tukhbatullin, e-mail: munir.tukhbatullin@tatar.ru

For citation: Kormilina A.R., Serova N.S., Tukhbatullin M.G., Baybikov R.S. Multiparametric ultrasound study of the nasal septum: prospective study // *Diagnostic radiology and radiotherapy*. 2026. Vol. 17, No. 2. P. 43–50, <http://doi.org/10.22328/2079-5343-2026-17-2-43-50>.

Введение. Полость носа представляет собой сложную анатомическую структуру, ограниченную спереди ноздрями и соединенную через хоаны с носоглоткой. Эта структура играет ключевую роль в анатомии и физиологии, обеспечивая связь с внешней средой и внутренними дыхательными путями. Анатомическое строение полости носа характеризуется наличием участков сужения и расширения, что придает ей воронкообразную форму. Основание полости носа сформировано нёбными костями и верхней челюстью, обеспечивая жесткость и стабильность каркаса. ПН, состоящая из хрящевых, костных элементов и слизистой оболочки, делит полость на две симметричные части и образует медиальную стенку. Ее средняя толщина составляет около 2 мм. Центральная часть носовой перегородки представлена хрящевой тканью, которая начинается от кончика носа и поддерживается двумя костными структурами, обеспечивающими стабильность и форму перегородки. В передней части носовой перегородки расположен четырехугольный хрящ, имеющий характерную форму. На границе хрящевой и костной тканей находится септальный бугорок (*organum Zuckerkandli*), рудиментарный орган, который в современной анатомии не имеет функционального значения. Колумелла представляет собой видимую часть мягких тканей носовой перегородки, разделяющую ноздри и включающую подвижную перегородку. Эта структура обеспечивает симметрию и функциональность носового дыхания. Анатомия хрящевой перегородки характеризуется наличием гиалинового хряща, который обеспечивает необходимую жесткость и эластичность. Питание хряща осуществляется через надхрящницу, что обеспечивает его регенеративные способности при травматических повреждениях [1].

Среди патологических состояний носовой перегородки можно выделить искривление, гребневидную деформацию, шип и S-образное искривление. Искривление перегородки представляет собой изменение положения хрящевого или костного каркаса относительно средней линии, что приводит к сужению носового хода. Этиологическими факторами могут быть врожденные дефекты, травмы или деформации, связанные с процессом роста [2]. Согласно данным современных исследований, от 75 до 80% населения земного шара страдают от различных форм деформации носовой перегородки. Вследствие этого хирургические вмешательства на данной анатомической структуре являются одной из наиболее часто выполняемых оториноларингологических операций в мировой медицинской практике. Тем не менее несмотря на высокий уровень про-

фессионализма специалистов, нежелательные исходы операций варьируются в пределах от 10 до 27%. Наиболее распространенными осложнениями являются перфорация перегородки, её флотация, вторичная деформация в передних отделах, а также деформация наружного носа. Формирование стойкой перфорации перегородки носа оказывает значительное негативное влияние на качество жизни пациентов, что, в свою очередь, приводит к повторным обращениям за медицинской помощью [3–8].

Сосудистая сеть носа характеризуется наличием анастомозов между ветвями наружной и внутренней сонных артерий. В передних отделах носовой перегородки эти анастомозы включают основно-нёбную артерию (ветвь внутренней челюстной артерии) и передние и задние решетчатые артерии (ветви глазничной артерии) и образуют сплетение Киссельбаха–Литтла. Наличие обширных сосудистых анастомозов объясняет высокую частоту носовых кровотечений, однако механизмы рецидивов после снижения артериального давления требуют дальнейшего изучения [9–11].

Современные исследования в области ринологии предоставляют новые возможности для комплексного изучения носа как сложного органа. Комплексный подход к изучению анатомии и физиологии носа позволяет выявить особенности его строения и функциональные характеристики. Однако методы лучевой диагностики, включая ультразвуковое исследование, остаются недостаточно разработанными, что ограничивает понимание патологических процессов и оценку состояния ПН.

Цель. Улучшение диагностики патологических состояний перегородки носа.

Материалы и методы. Исследование одобрено этическим комитетом Казанской государственной медицинской академии — филиала ФГБОУ ДПО РМАНПО Минздрава России, протокол № 04/11, от 5 ноября 2025 г. Информированное согласие получено от каждого пациента. Всего проведены УЗИ ПН у 128 пациентов (72 женщин и 56 мужчин в возрасте от 18 до 69 лет). Исследования проводились на базе ГАУЗ «Республиканская клиническая больница» Минздрава Республики Татарстан. Исследование соответствует этическим стандартам Хельсинкской декларации. В контрольную группу входили 30 субъектов без патологии ПН. В первую группу входили 52 пациента с перфорацией ПН. Вторая группа состояла из 46 пациентов с искривлениями ПН. Исследования проведены на ультразвуковых аппаратах экспертного уровня (i-800, Canon; Resona 7, Mindray) линейными датчиками частотой в диапазоне от 3 до 20 МГц. Многокомпонентное (мультипараметрическое) УЗИ

включало: В-режим, режим цветового дуплексного сканирования (ЦДС), ультразвуковая эластография сдвиговой волной (УЭСВ). Перед исследованием, для улучшения визуализации, в полость носа поочередно вводили 1–2 мл стерильный ультразвуковой гель. Дыхание проводилось через другую ноздрию или через рот. УЗИ носовой перегородки проводили последовательно с обеих сторон. В серошкальном В-режиме изучали структуру, контуры, эхогенность ПН. Артериальные сосуды ПН изучали по общепринятым методам с применением режима ЦДС, определяли параметры кровотока: максимальная линейная скорость кровотока в см/сек — $V_{\max}$, минимальная линейная скорость кровотока в см/сек — $V_{\min}$, индекс резистентности сосудов — Ri в ед. Для определения эластичности ПН (в кПа) применяли режим УЭСВ.

Статистический анализ проводили в программном пакете SPSS версии 21.0. Оценку нормальности распределения выборок проводили с помощью критерия Колмогорова–Смирнова. В качестве параметров описательной статистики для нормально распределенных непрерывных показателей рассчитывали среднее арифметическое (стандартное отклонение), для ненормально распределенных — медиану и размах вариации. Статистическая значимость различия средних значений показателей в двух группах при нормальном распределении показателей оценивалась путем использования критерия Стьюдента, между тремя или более группами — путем однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA). При ненормальном распределении сравниваемых переменных использовали критерий Уилкоксона. Оценку корреляций нормально распределенных выборок производили с использованием коэффициента Пирсона, ненормально — коэффициентов Спирмена или Кендалла.

Результаты. УЗИ ПН в В-режиме показало следующие данные. Хрящевая часть ПН в норме визуализируется в виде однородной изоэхогенной структуры, с четкими контурами. Септальный бугорок на границе хрящевой и костной тканей визуализируется в виде гиперэхогенного участка с четкими контурами. Колумелла, которая представляет собой видимую часть мягких тканей носовой перегородки визуализируется как гипоэхогенная структура с четкими контурами (рис. 1). Эхографическая картина при искривлениях ПН зависит от типа искривлений. При S-образном искривлении визуализируется деформация перегородки в виде отклонения от средней линии. При искривлениях в виде гребня или шипа в хрящевом отделе ПН визуализируются гиперэхогенные участки разных размеров и локализаций.

Перфоративные отверстия ПН, различные по размерам, визуализируется в виде анэхогенных участков с четкими контурами (рис. 2).

В режиме ЦДС изучены параметры кровотока в сосудистом сплетении ПН, с определением домини-



Рис. 1. Эхограмма хрящевого отдела перегородки носа.

Стрелкой указана колумелла

Fig. 1. Echogram of the cartilaginous part of the nasal septum. The arrow indicates the columella

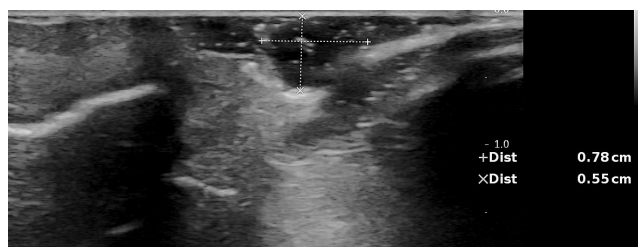


Рис. 2. Эхограмма в В-режиме. Перфоративное отверстие в хрящевом отделе перегородки носа, размерами 0,78×0,55 см

Fig. 2. Echogram in B-mode. A perforated hole in the cartilaginous part of the nasal septum, with dimensions of 0.78×0.55 cm

рующих артерий (ДА) с обеих сторон ПН, параметры кровотока которых были максимальными по сравнению с остальными артериями. Значения $V_{\max}$ и Ri в ДА с обеих сторон достоверно не различались ($p=0,103$ и $0,982$ соответственно). Средние значения $V_{\max}$ ДА составили 26,000 (14,000–38,000) см/сек ($p<0,001$ в обоих случаях). Медиана Ri в ДА составляла 0,5650 (0,3500–0,6900), $p<0,001$ в обоих случаях. Однако значения $V_{\min}$ справа были достоверно меньше, чем слева (11,000 [7,000–17,000]) и 11,000 [9,000–17,000] см/сек соответственно, $p=0,041$).

У обследуемых контрольной группы в ДА диапазон максимальной скорости кровотока составлял 15–35 см/сек, Ri составлял от 0,5 до 0,60 ед. (рис. 3).

Результаты гемодинамических показателей ДА в первой группе (перфорация ПН) до вмешательств на ПН представлены в табл. 1, с выделением показателей кровотока у 4 обследуемых, которые значительно отличались от показателей контрольной группы. Параметры кровотока в ДА во второй группе (искривления ПН) не отличались от показателей контрольной группы.

УЭСВ ПН показала следующие результаты. В контрольной группе значения жесткости ПН составили ($\pm$ стандартное отклонение [SD]) $36,49 \pm 4,40$ кПа (рис. 4) и эти значения показали рост по мере увеличения возраста обследуемых. Данная зависимость хорошо описывается линейной моделью ($r^2=0,95$): $\text{Stiff}=0,31 \times \text{Age} + 15,516$, где: Stiff — жесткость хрящевой части новой перегородки (кПа), Age — возраст (годы).

В первой группе обследуемых значения жесткости ПН показали, что линейная зависимость значений

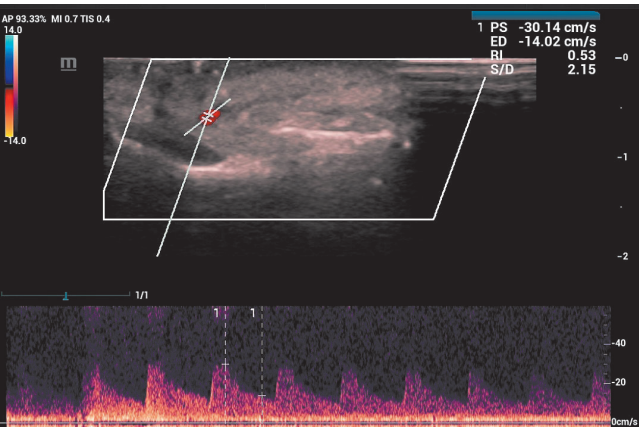


Рис. 3. Эхограмма в режиме ЦДС, вариант нормы. Доминирующая артерия сосудистого сплетения перегородки носа, $V_{\max}$ =30,14 см/сек, Ri =0,53 ед.
Fig. 3. Echogram in color duplex scanning, normal variant. Dominant artery of the vascular plexus of the nasal septum, $V_{\max}$ =30.14 cm/s, Ri =0.53 units

ции хрящевой части ПН были достоверно выше таковых в норме ($43,05\pm3,44$ кПа; $p<0,001$). Определены пограничные значения для верхней границы нормальной жесткости ПН. При использовании в качестве пограничных значений верхней границы нормы таковых, превышавших рассчитанные нормальные для соответствующего возраста на +2 SD (8,8), значения чувствительности и специфичности составили 100% и 100%, соответственно (табл. 2). Значение площади под ROC-кривой составило 1,000.

Во второй группе обследуемых наблюдалось повышение жесткости хрящевого отдела ПН ($38,08\pm2,24$; $p<0,01$) в случаях выраженных искривлений ПН в виде гребневидной деформации, образовании шипа (рис. 5).

Чувствительность при этом составила 82% (истинноположительный результат 42 случая, ложноотрицательный результат 9 случаев; $ИПР/ИПР+ЛОР$; $(42/42+9)\times100=82\%$), специфичность составила 75% (истинноотрицательный результат 6 случаев, ложноположительный результат 2 случая; $ИОР/ИОР+ЛПР$; $(6/6+2)\times100=75\%$).

Таблица 1

Параметры кровотока доминирующей артерии сосудистого сплетения перегородки носа в первой группе

Обследуемые 1-й группы	$V_{\max}$, см/сек			Ri , ед.		
	медиана	min	max	медиана	min	max
48	26,0	14,0	35,0	0,54	0,50	0,59
4	10,0	8,0	15,0	0,56	0,52	0,62

жесткости ПН от возраста обследуемых значительно нарушается и r^2 Пирсона составляет всего 0,679 ($p<0,001$), что не позволило точно моделировать данную зависимость. Значения жесткости при перфора-

Обсуждение. До недавнего времени для исследования полости и перегородки носа преимущественно использовались рентгенография и КТ, реже применялась МРТ. Внедрение в клиническую практику

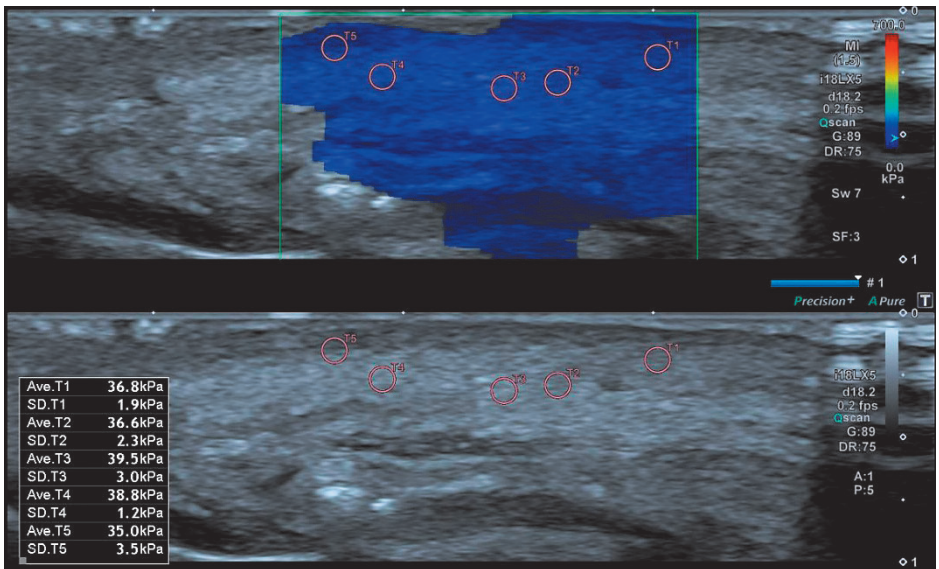


Рис. 4. Эластограмма хрящевого отдела перегородки носа у обследуемого Т., 69 лет. Жесткость составляет от 35,0 кПа до 39,5 кПа
Fig. 4. Elastogram of the cartilaginous part of the nasal septum in the examined T., 69 years old. The hardness ranges from 35.0 kPa to 39.5 kPa

Таблица 2

Матрица соответствия при ROC-анализе

Table 2

Прогнозируемый результат	Наблюдаемый результат	
	есть перфорация перегородки носа	нет перфорации перегородки носа
Есть перфорация перегородки носа	52	0
Нет перфорации перегородки носа	0	30

современных ультразвуковых технологий позволило значительно шире использовать УЗИ для исследования полости и перегородки носа. В серошкальном В-режиме четко удается визуализировать хрящевой

вотока в тканях вышележащих отделов полости носа (откуда выкраивается лоскут) и в ДА сосудистого сплетения ПН [13]. С учетом этой зависимости можно с большой точностью прогнозировать при-

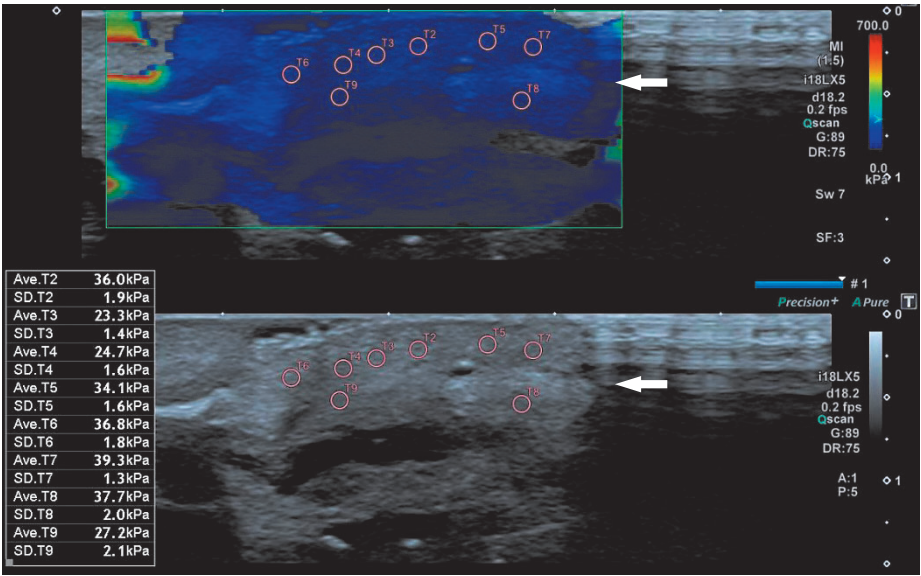


Рис. 5. Эластограмма у пациента М., 46 лет, с искривлением перегородки носа в виде шипа (стрелка), где определяется повышенная эхогенность и жесткость (точки Т7 и Т8) от 37,7 до 39,3 кПа

Fig. 5. The elastogram of patient M., 46 years old, with a curvature of the nasal septum in the form of a spike (arrow), where increased echogenicity and stiffness (points T7 and T8) are determined from 37.7 to 39.3 kPa

отдел ПН и определить те ультразвуковые критерии, которые характерны для нормы и для патологических состояний. Среди патологических состояний ПН часто встречается перфорация ее хрящевого отдела. УЗИ позволяет четко определить размеры, контуры и локализацию перфоративного отверстия. Для закрытия дефекта ПН в клинической практике часто используют эндоназальный лоскут слизистой оболочки, который выкраивают выше перфоративного отверстия и закрывают дефект путем перемещения свободного лоскута. Для нормального приживления перемещенного лоскута слизистой оболочки большое значение имеет состоятельность сосудов, которые питают данный лоскут [12]. Для прогнозирования приживления перемещенного лоскута важны параметры кровотока в тканях, расположенных выше перфоративного отверстия, откуда и будет выкраиваться эндоназальный лоскут для закрытия дефекта ПН. ЦДС сосудов в сосудистом сплетении ПН с выделением параметров ДА позволяет четко прогнозировать приживляемость данных лоскутов слизистой оболочки. Есть прямая зависимость параметров кро-

живление перемещаемых эндоназальных лоскутов при пластических операциях на ПН. Как показывают проведенные исследования, одним из условий для возникновения перфораций ПН является нарушение ее васкуляризации. При снижении V_{max} в ДА сосудистого сплетения ПН (менее 15 см/сек) и повышении Ri (более 0,59 ед.) значительно ухудшаются условия для нормального приживления перемещенных эндоназальных лоскутов, используемых для закрытия дефекта ПН. Изучение эластичности хрящевого отдела ПН достоверно показывает повышение его жесткости с возрастом. Значения жесткости повышаются при перфорации ПН ($43,05 \pm 3,44$ кПа; $p < 0,001$), что также объясняется нарушением васкуляризации ПН при данной патологии. Искривления ПН мало влияют на ее васкуляризацию, однако искривления в виде «шипа» повышают ее жесткость.

Заключение. Многокомпонентное УЗИ ПН позволяет достоверно получать результаты о состоянии ее хрящевого отдела, выявить деформации и дефекты перегородки, изучить параметры сосудов, участвующих в кровоснабжении ПН, эластичность ПН

в норме и при патологии. Результаты проведенных исследований будут способствовать лучшему пониманию патологических процессов в ПН и ее состояния в определенный период наблюдения.

Сведения об авторах:

Кормилина Алсу Рифкатовна — кандидат медицинских наук, доцент кафедры ультразвуковой диагностики Казанской государственной медицинской академии — филиала федерального государственного бюджетного образовательного учреждения дополнительного профессионального образования «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 420012, Казань, ул. Бутлерова, д. 36; e-mail: alsu.kormilina@gmail.com; ORCID 0000–0002–3549–4421;

Серова Наталья Сергеевна — доктор медицинских наук, профессор, академик РАН, профессор кафедры лучевой диагностики и лучевой терапии, Институт клинической медицины имени Н. В. Склифосовского федерального государственного бюджетного образовательного учреждения дополнительного профессионального образования «Первый Московский государственный медицинский университет имени И. М. Сеченова (Сеченовский Университет)» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 119048, Москва, ул. Трубецкая, д. 8, стр. 2; e-mail: dr.serova@yandex.ru; ORCID 0000–0001–6697–7824;

Тухбатуллин Мунир Габдулфатович — доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой ультразвуковой диагностики Казанской государственной медицинской академии — филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения дополнительного профессионального образования «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 420012, Казань, ул. Бутлерова, д. 36; e-mail: munir.tuhbatullin@tatar.ru; ORCID 0000–0002–0055–4746;

Байбиков Рашид Салихович — кандидат медицинских наук, доцент кафедры ультразвуковой диагностики Казанской государственной медицинской академии — филиала федерального государственного бюджетного образовательного учреждения дополнительного профессионального образования «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 420012, Казань, ул. Бутлерова, д. 36; e-mail: rashit.baybikov@tatar.ru; ORCID 0000–0002–3643–1828.

Information about the authors:

Alsu R. Kormilina — Cand. of Sci. (Med.), Associate Professor, Kazan State Medical Academy — Branch Campus of the Federal State Budgetary Educational Institution of Further Professional Education «Russian Medical Academy of Continuing Professional Education» of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation; 420012, Butlerov str., 36, Kazan, Russia; e-mail: alsu.kormilina@gmail.com; ORCID 0000–0002–3549–4421;

Natalia S. Serova — Dr. of Sci. (Med.), Professor, Academician of Russian Academy of Sciences; N. V. Sklifosovsky Institute of Clinical Medicine, I. M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University), Professor of Department of Radiation Diagnostics and Radiation Therapy; 119048, Trubetskaya str., 8, build. 2, Moscow, Russia; e-mail: dr.serova@yandex.ru; ORCID 0000–0001–6697–7824;

Munir G. Tuhbatullin — Dr. of Sci. (Med.), Professor, Kazan State Medical Academy — Branch Campus of the Federal State Budgetary Educational Institution of Further Professional Education «Russian Medical Academy of Continuing Professional Education» of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Head of the Department of Ultrasound Diagnosis; 420012, Butlerov str., 36, Kazan, Russia; e-mail: munir.tuhbatullin@tatar.ru; ORCID 0000–0002–0055–4746;

Rashit S. Baybikov — Cand. of Sci. (Med.), Associate Professor, Kazan State Medical Academy — Branch Campus of the Federal State Budgetary Educational Institution of Further Professional Education «Russian Medical Academy of Continuing Professional Education» of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation; 420012, Butlerov str., 36, Kazan, Russia; e-mail: rashit.baybikov@tatar.ru; ORCID 0000–0002–3643–1828.

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства, согласно международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распределен следующим образом: концепция и план исследования — *А. Р. Кормилина, Н. С. Серова*; сбор и анализ данных — *А. Р. Кормилина, М. Г. Тухбатуллин, Р. С. Байбиков*; подготовка рукописи — *А. Р. Кормилина, М. Г. Тухбатуллин*.

Authors' contributions. All authors confirm their authorship according to the international ICMJE criteria (all authors made substantial contributions to the conception, research, and preparation of the article, and read and approved the final version before publication). Special contribution: *ARK, NSS* aided in the concept and plan of the study; *RSB, MGT* provided collection and analysis of data; *ARK, MGT* preparation of the manuscript.

Потенциальный конфликт интересов: авторы подтверждают отсутствие конфликта интересов, который необходимо обнародовать.

Disclosure: the authors confirm that there is no conflict of interest that needs to be made public.

Соответствие принципам этики. Исследование одобрено этическим комитетом Казанской государственной медицинской академии — филиала ФГБОУ ДПО РМАНПО Минздрава России, протокол № 04/11, от 5 ноября 2025 г. Информированное согласие получено от каждого пациента.

Adherence to ethical standards. The study was approved by the local ethics committee of the Kazan State Medical Academy — Branch Campus of the Federal State Budgetary Educational Institution of Further Professional Education «Russian Medical Academy of Continuing Professional Education» of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Protocol No. 04/11, dated 05.11.2025. Informed consent was obtained from each patient.

Финансирование: Работа выполнена за счет гранта №5/2025-ПД-КГМА от 22.12.2025 г. предоставленного Академией наук Республики Татарстан образовательным организациям высшего образования.

Financing: The work was carried out at the expense of grant No. 5/2025-PD-KGMA dated 12/22/2025 provided by the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan to educational organizations of higher education.

Поступила/Received: 12.02.2026

Принята к печати/Accepted: 29.05.2026

Опубликована/Published: 29.06.2026

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Луцай Е.Д., Кирксова Л.С., Аникин М.И. и др. Современные представления о развитии и строении носовой полости человека // *Медицинский вестник Башкортостана*. 2021. Т. 16, № 1 (91). С. 132–138. [Lutsay E.D., Kirksova L.S., Anikin M.I. et al. Modern concept of the human nasal cavity development and structure. *Medical Bulletin of Bashkortostan*, 2021, Vol. 16, No. 1 (91), pp. 132–138 (In Russ.)]. ISSN: 1999–6209. doi: medj.rucl.ru/journal/4d45444a2d4249424c2d30303030303137363037.
2. Baddam P., Young D., Dunsmore G. et al. Nasal Septum Deviation as the Consequence of BMP-Controlled Changes to Cartilage Properties // *Front. Cell Dev. Biol.* 2021. No. 9 (696545). P. 1–19. doi: 10.3389/fcell.2021.696545.
3. Sapmaz E., Toplu Y., Somuk B.T. A new classification for septal perforation and effect softreatment methods on quality of life // *Braz. J. Otorhinolaryngol.* 2019. Vol. 85, No. 6. P. 716–723. https://doi: 10.1016/j.bjorl.2018.06.003.
4. Kridel R.W. Considerations in the etiology, treatment, and repair of septal perforations // *Facial Plast Surg Clin North Am.* 2004. Vol. 12, No. 4. P. 435–450. doi: 10.1016/j.fsc.2004.04.014.
5. Valsamidis K., Titelis K., Karkos P., Markou K., Constantinidis J., Triaridis S. Predictive factors of patients' general quality of life after nasal septoplasty // *Eur. Arch. Otorhinolaryngol.* 2019. Vol. 276, No. 2. P. 429–438. https://doi: 10.1007/s00405-018-5229-4.
6. Shcherbakov D.A., Kokareva V.V., Cheremnykh N.I., Shcherbakova A.F. Computational Aerodynamics in Nasal Septal Perforation // *International Journal of Biomedicine*. 2020. No. 1. P. 82–85. http://dx.doi.org/10.21103/Article10(1)_CR3.
7. Hussein A.A., Hassan M.A., Abdaljabbar A.H. Effect of Septoplasty on Headache among Patients with Septal Deviation in Karbala, Iraq 2023 // *Int. Tinnitus J.* 2024. Vol. 28, No. 1. P. 145–150. https://doi: 10.5935/0946-5448.20240021.
8. Карпищенко С.А., Александров А.Н., Баранская С.В., Фаталиева А.Ф. Коррекция перегородки носа при вмешательствах на верхнечелюстной пазухи // *Российская оториноларингология*. 2018. № 2 (93). С. 44–47. [Karpishchenko S.A., Aleksandrov A.N., Baranskaya S.V., Fatalieva A.F. Correction of nasal septum in the interventions on paranasal sinus. *Russian Otorhinolaryngology*, 2018, No. 2 (93), pp. 44–47 (In Russ.)]. doi: 10.18692/1810-4800-2018-2-44-47.
9. Аведисян В.Э. К вопросу клинической анатомии сосудистого русла полости носа // *Современные наукоемкие технологии*. 2007. № 5. С. 58–59. [Avedisyan V.E. On the Issue of Clinical Anatomy of the Vascular Bed of the Nasal Cavity. *Modern high-tech technologies*, 2007, No. 5, pp. 58–59 (In Russ.)].
10. Харченко В.В. Морфология сосудов притока различных зон слизистой оболочки носа // *Российская ринология*. 2003. № 2. С. 19. [Kharchenko V.V. Morphology of inflow vessels of various zones of nasal mucosa. *Russian rhinology*, 2003, No. 2, p. 19 (In Russ.)]. https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=10312.
11. Елизарьев В.В., Савельева Е.Е. Сравнительная оценка кровоснабжения слизистой перегородки носа после септопластики с использованием двух видов интраназальных сплинтов // *Уральский медицинский журнал*. 2020. № 1. С. 101–104. [Elizaryev V.V., Savelyeva E.E. Comparative evaluation of blood supply to the septum after septoplasty using two types of intranasal splints. *Ural Medical Journal*, 2020, No. 1, pp. 101–104 (In Russ.)]. http://elib.usma.ru/handle/usma/18868.
12. Пустовит О.М. Послеоперационная реабилитация структур слизистой оболочки носа и околоносовых пазух в ринохирургии // *Российская оториноларингология*. 2017. № 2 (87). С. 120–127. [Pustovit O.M. Postoperative rehabilitation of the structures of the mucous membrane of the nose and paranasal sinuses in rhinosurgery. *Russian Otorhinolaryngology*, 2017, No. 2 (87), pp. 120–127 (In Russ.)]. doi: https://doi.org/10.18692/1810-4800-2017-2-120-127.
13. Кормилина А.Р., Серова Н.С., Тухбатуллин М.Г., Гилялов М.Н. Ультразвуковое исследование зоны Киссельбаха–Литтла // *Acta Medica Eurasica*. 2025. № 2. С. 24–30. [Kormilina A.R., Serova N.S., Tukhatullin M.G., Gilyalov M.N. Ultrasonic study of the Kisselbach–Little zone. *Acta Medica Eurasica*, 2025, No. 2, pp. 24–30 (In Russ.)]. doi: 10.47026/2413-4864-2025-2-24-30.

Открыта подписка на 2-е полугодие 2026 года.

Подписной индекс:

«Урал Пресс» (Пресса России) 014023

УДК 616.36-004-073.756.8:616.411

<http://doi.org/10.22328/2079-5343-2026-17-2-51-60>

НАТИВНОЕ T1-КАРТИРОВАНИЕ И ФРАКЦИЯ ВНЕКЛЕТОЧНОГО ОБЪЕМА ПЕЧЕНИ И СЕЛЕЗЕНКИ В СТРАТИФИКАЦИИ ЦИРРОЗА ПЕЧЕНИ ПО КЛАССАМ ШКАЛЫ ЧАЙЛД-ПЬЮ: РЕТРОСПЕКТИВНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

^{1,2}Ю. Н. Савченков[✉], ³Г. Е. Труфанов[✉], ³В. А. Фокин[✉], ²Е. А. Ионова[✉], ⁴А. П. Савченкова[✉], ¹В. А. Просиков[✉],
^{1,5}С. Э. Аракелов[✉]

¹Городская клиническая больница имени В. П. Демикова, Москва, Россия

²Федеральный медицинский биофизический центр имени А. И. Бурназяна, Москва, Россия

³Национальный медицинский исследовательский центр имени В. А. Алмазова, Санкт-Петербург, Россия

⁴Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий, Москва, Россия

⁵Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Россия

ВВЕДЕНИЕ: Цирроз печени является конечной стадией хронических заболеваний печени и сопровождается развитием портальной гипертензии, что приводит к изменению количественных магнитно-резонансных (МР)-показателей печени и селезенки. Неинвазивные методики, включая нативное T1-картирование и расчет фракции внеклеточного объема (ФВО), рассматриваются как перспективные инструменты стратификации тяжести заболевания, однако их сравнительная диагностическая эффективность при распределении пациентов по классам шкалы оценки тяжести и компенсации цирроза Чайлд-Пью изучена недостаточно.

ЦЕЛЬ: Оценить и сравнить диагностическую эффективность нативного T1-картирования и ФВО печени и селезенки при стратификации цирроза печени по классам шкалы оценки тяжести и компенсации цирроза Чайлд-Пью.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ: Ретроспективное исследование включало обследование 50 пациентов с подтвержденным циррозом печени, которым выполнена мультипараметрическая магнитно-резонансная томография (МРТ) с нативным T1-картированием (протоколы MOLI 4(1)3(1)2 и 5(3)3) и расчетом ФВО печени и селезенки. Пациентов стратифицировали по классам Чайлд-Пью: А (n=31), В (n=13), С (n=6).

Статистика: Проведен межгрупповой анализ (критерии Крускала–Уоллиса, Манна–Уитни с поправкой Бенджамини–Хохберга, FDR), корреляционный анализ Спирмена и ROC-анализ с расчетом площади под кривой (AUROC) и попарным сравнением кривых (тест Делонга).

РЕЗУЛЬТАТЫ: Выявлены статистически значимые межгрупповые различия для всех количественных МР-показателей ($p \leq 0,002$; FDR $< 0,05$). ФВО печени продемонстрировала наивысшую дискриминационную способность (AUROC 1,000 — А vs С; 0,985 и 0,954 — А vs В; 0,986 — В vs С). Нативное T1-картирование печени характеризовалось умеренной эффективностью (AUROC 0,728–0,893). Нативное T1-картирование селезенки показало более низкие и вариабельные значения AUROC (0,436–0,857). ФВО селезенки уступала ФВО печени по диагностической эффективности (AUROC 0,812–0,971). Наиболее сильная корреляция с суммарным баллом по шкале Чайлд-Пью отмечена для ФВО печени (p 0,879–0,892; $p < 0,001$).

ОБСУЖДЕНИЕ: Полученные данные отражают более высокую специфичность ФВО печени по сравнению с интегральными показателями нативного T1-картирования в отношении функциональной тяжести цирроза печени по шкале Чайлд-Пью. ФВО селезенки преимущественно характеризует гемодинамические проявления портальной гипертензии и менее тесно связана с нарастанием печеночно-клеточной недостаточности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ: ФВО печени является наиболее точным и информативным количественным МР-показателем при стратификации цирроза по классам шкалы Чайлд-Пью, превосходя по диагностической ценности T1-картирование печени, ФВО селезенки и T1-картирование селезенки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цирроз печени, шкала Чайлд-Пью, фракция внеклеточного объема, T1-картирование, магнитно-резонансная томография, портальная гипертензия

* Для корреспонденции: Савченков Юрий Николаевич, e-mail: yura_savchenkov@mail.ru

Для цитирования: Савченков Ю.Н., Труфанов Г.Е., Фокин В.А., Ионова Е.А., Савченкова А.П., Просиков В.А., Аракелов С.Э. Нативное T1-картирование и фракция внеклеточного объема печени и селезенки в стратификации цирроза печени по классам шкалы Чайлд-Пью: ретроспективное исследование // *Лучевая диагностика и терапия*. 2026. Т. 17, № 2. С. 51–60, doi: <http://doi.org/10.22328/2079-5343-2026-17-2-51-60>.

NATIVE T1 MAPPING AND LIVER AND SPLENIC EXTRACELLULAR VOLUME FRACTION IN THE STRATIFICATION OF LIVER CIRRHOSIS ACCORDING TO CHILD-PUGH CLASSES: A RETROSPECTIVE STUDY

^{1,2}Yury N. Savchenkov[✉], ³Gennadiy E. Trufanov[✉], ³Vladimir A. Fokin[✉], ²Elena A. Ionova[✉],

⁴Alina P. Savchenkova[✉], ¹Valentin A. Prosikov[✉], ^{1,5}Sergey E. Arakelov[✉]

¹V. P. Demikhov City Clinical Hospital, Moscow Healthcare Department, Moscow, Russia

²A. I. Burnazyan Federal Medical Biophysical Center, Federal Medical Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

³V. A. Almazov National Medical Research Centre, St. Petersburg, Russia

⁴Scientific and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies, Moscow Healthcare Department, Moscow, Russia

⁵Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

INTRODUCTION: Liver cirrhosis represents the end stage of chronic liver diseases and is associated with the development of portal hypertension, leading to alterations in quantitative magnetic resonance (MR) parameters of the liver and spleen. Non-invasive techniques, including native T1 mapping and extracellular volume fraction (ECV) calculation, are considered promising tools for disease severity stratification; however, their comparative diagnostic performance in classifying patients according to the Child-Pugh grading system remains insufficiently investigated.

OBJECTIVE: To evaluate and compare the diagnostic performance of native T1 mapping and liver and splenic extracellular volume fraction for stratifying liver cirrhosis according to Child-Pugh classes.

MATERIALS AND METHODS: This retrospective study included 50 patients with confirmed liver cirrhosis who underwent multiparametric magnetic resonance imaging (MRI) with native T1 mapping (MOLLI 4(1)3(1)2 and 5(3)3 protocols) and calculation of liver and spleen extracellular volume fraction (ECV). Patients were stratified according to Child-Pugh classes: A (n=31), B (n=13), and C (n=6).

Statistics: Intergroup analysis was performed using the Kruskal-Wallis and Mann-Whitney tests with Benjamini-Hochberg correction (FDR), along with Spearman correlation analysis and ROC analysis with calculation of the area under the curve (AUROC) and pairwise comparison of ROC curves using the DeLong test.

RESULTS: Statistically significant intergroup differences were observed for all quantitative MRI parameters ($p < 0.002$; FDR < 0.05). Liver extracellular volume fraction (ECV) demonstrated the highest discriminative performance (AUROC 1.000 for A vs C; 0.985 and 0.954 for A vs B; 0.986 for B vs C). Native liver T1 mapping showed moderate diagnostic efficiency (AUROC 0.728–0.893). Native spleen T1 mapping yielded lower and more variable AUROC values (0.436–0.857). Spleen ECV was inferior to liver ECV in diagnostic performance (AUROC 0.812–0.971). The strongest correlation with the total Child-Pugh score was observed for liver ECV (ρ 0.879–0.892; $p < 0.001$).

DISCUSSION: The findings indicate higher specificity of liver ECV compared with integral native T1 mapping parameters in reflecting the functional severity of cirrhosis according to the Child-Pugh classification. Spleen ECV primarily reflects hemodynamic manifestations of portal hypertension and is less closely associated with progression of hepatocellular insufficiency.

CONCLUSION: Liver ECV is the most accurate and informative quantitative MR parameter for stratifying cirrhosis according to Child-Pugh classes, outperforming native liver T1 mapping, spleen ECV, and spleen T1 mapping in diagnostic value.

KEYWORDS: liver cirrhosis, Child-Pugh score, extracellular volume fraction, T1 mapping, magnetic resonance imaging, portal hypertension

* For correspondence: Yury N. Savchenkov, e-mail: yura_savchenkov@mail.ru

For citation: Savchenkov Yu.N., Trufanov G.E., Fokin V.A., Ionova E.A., Savchenkova A.P., Prosikov V.A., Arakelov S.E. NATIVE T1 mapping and liver and splenic extracellular volume fraction in the stratification of liver cirrhosis according to Child-Pugh classes: a retrospective study // *Diagnostic radiology and radiotherapy*. 2026. Vol. 17, No. 2. P. 51–60, <http://doi.org/10.22328/2079-5343-2026-17-2-51-60>.

Введение. Цирроз печени представляет собой терминальную стадию хронических заболеваний печени и характеризуется выраженным нарушением архитектоники паренхимы, развитием портальной гипертензии и прогрессированием печеночно-клеточной недостаточности [1]. Прогноз заболевания определяется не только наличием цирроза как такового, но и степенью функциональной недостаточности печени [2, 3]. В клинической практике стратификация цирроза осуществляется по шкале оценки

тяжести и компенсации цирроза Чайлд-Пью, включающей совокупность клинических и лабораторных критериев. Данная шкала широко используется для оценки прогноза и определения тактики ведения пациентов [4, 5].

При этом шкала Чайлд-Пью отражает преимущественно функциональное состояние печени и не дает количественной характеристики структурных и гемодинамических изменений. В этой связи представляет интерес сопоставление клинической стра-

тификации по классам Чайлд-Пью с количественными МР-показателями, отражающими морфологические и микроциркуляторные изменения [6, 7].

Мультипараметрическая МРТ обеспечивает независимую количественную оценку тканевых характеристик печени и селезенки. Нативное T1-картирование печени отражает интегральные изменения времени продольной релаксации, связанные с тканевым составом, воспалительными изменениями и перестройкой внеклеточного матрикса [8, 9]. ФВО рассчитывается по данным T1-картирования до и после внутривенного контрастирования с учетом гематокрита и позволяет количественно оценить долю интерстициального пространства в ткани. Поскольку прогрессирование фиброза сопровождается накоплением внеклеточного матрикса, увеличение данного показателя закономерно связано с выраженностью структурной перестройки паренхимы печени. В условиях цирроза это делает ФВО потенциально более специфичным количественным маркером тяжести морфологических изменений, чем интегральные показатели нативного T1-картирования [10, 11]. Аналогичные показатели селезенки могут отражать системные и гемодинамические проявления портальной гипертензии при циррозе печени [12].

Возможности количественных МР-показателей в стратификации цирроза печени по классам шкалы Чайлд-Пью и их сравнительная диагностическая эффективность остаются недостаточно изученными и требуют уточнения. Анализ доступной отечественной литературы не выявил публикаций, непосредственно посвященных сравнительной оценке нативного T1-картирования и ФВО печени и селезенки при стратификации цирроза печени по классам шкалы Чайлд-Пью.

С учетом различий в патофизиологической основе анализируемых показателей сформулирована гипотеза о том, что ФВО печени, непосредственно связанная с увеличением внеклеточного пространства при фиброзной перестройке паренхимы, будет точнее соответствовать клинической стратификации цирроза по шкале Чайлд-Пью, чем нативное T1-картирование печени. В то же время показатели селезенки, отражающие преимущественно гемодинамические проявления портальной гипертензии, будут обладать меньшей специфичностью в отношении функциональной тяжести цирроза.

Цель. Оценить и сравнить диагностическую эффективность нативного T1-картирования и ФВО печени и селезенки при стратификации цирроза печени по классам шкалы оценки тяжести и компенсации цирроза Чайлд-Пью.

Материалы и методы. Исследование было одобрено локальным этическим комитетом ГБУЗ «ГКБ им. В. П. Демикова ДЗМ» (протокол № 4 от 19.11.2025). Информированное согласие было получено от всех участников, включенных в исследование.

Проанализированы данные 50 пациентов с циррозом печени, обследованных на высокопольном

МР-томографе Magnetom Vida 3 Тл (Siemens, Германия) в ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России. Всем пациентам выполнена мультипараметрическая МРТ с получением количественных показателей T1-картирования и ФВО печени и селезенки. Мужчины составили 52% (n=26), женщины — 48% (n=24); медианный возраст — 50 [45; 58,8] лет.

Этиологию цирроза устанавливали на основании совокупности данных анамнеза, лабораторных показателей и результатов инструментальных методов исследования: вирусные гепатиты В и С — 38 пациентов (76%), аутоиммунные заболевания печени — 6 пациентов (12%), метаболически-ассоциированная жировая болезнь печени — 6 пациентов (12%). Пациенты стратифицированы по шкале оценки тяжести и компенсации цирроза Чайлд-Пью (класс А — 31 пациент, 62%; В — 13 человек, 26%; С — 6 пациентов, 12%) на основании клинико-лабораторных данных на момент МР-исследования. Медианный суммарный балл составил 7 [6; 9] (диапазон 5–13).

Оценку времени T1-релаксации проводили с применением модифицированной последовательности восстановления инверсии Лука-Локепа (Modified Look-Locker Inversion Recovery, MOLLI) с кардиосинхронизацией по пульсу на одной задержке дыхания. Использовали протоколы MOLLI 4(1)3(1)2 и MOLLI 5(3)3, отличающиеся схемой инверсионных импульсов и распределением сердечных циклов между фазами регистрации сигнала и его восстановления. Количество сердечных циклов, в течение которых осуществляется сбор изображений после инверсионного импульса, обозначается цифрами вне скобок, тогда как значения в скобках соответствуют числу циклов, отведенных на восстановление продольной намагниченности перед следующей инверсией (recovery time). Выбор анализируемых протоколов T1-картирования определялся возможностями программного обеспечения МР-томографа с включением обоих вариантов, реализованных на данной платформе.

Такое распределение фаз измерения и восстановления сигнала определяет длительность задержки дыхания, чувствительность методики к частоте сердечных сокращений и потенциальную точность расчета времени T1-релаксации.

Значения T1-релаксации печени рассчитывали как среднее по зонам измерения в сегментах S2, S4a, S7 и S8 (10–20 см²) с исключением сосудов и очаговых образований. В селезенке формировали три зоны интереса (5–10 см²). Зоны измерения с сохранением геометрии переносили на постконтрастные карты для расчета ФВО (рис. 1).

ФВО рассчитывали по формуле:

$$\text{ФВО} = (1 - \text{Hct}) \times (\Delta R1_{\text{органа}} / \Delta R1_{\text{аорты}}),$$
 где Hct — гематокрит, представленный в долях единицы (л/л). Параметр $\Delta R1$ отражает изменение скорости продольной релаксации ткани после введения

контрастного вещества и определяется как разность величин $R1_{post}$ и $R1_{pre}$. Скорость продольной релаксации ($R1$) вычисляли как величину, обратную времени $T1$ ($R1=1/T1$; c^{-1}) до и через 10 минут после внутривенного контрастирования. Расчет

(AUROC) с определением 95% доверительных интервалов методом бутстрэп-перестановок (2000 итераций) и сравнением кривых по тесту Делонга (DeLong). Рассчитывали чувствительность (Se), специфичность (Sp), положительную (PPV) и отрица-

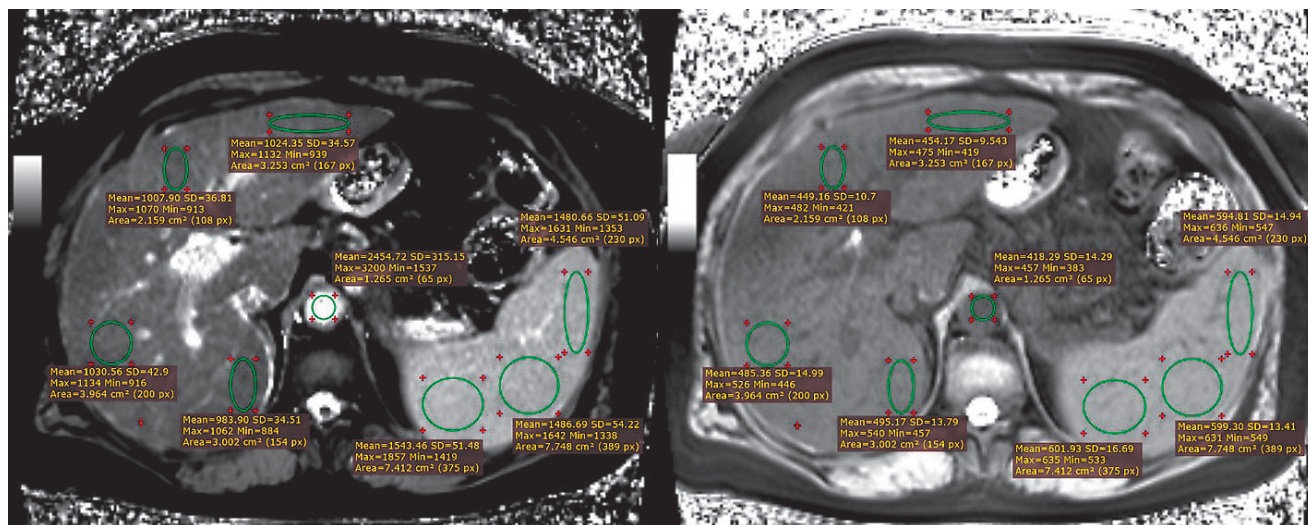


Рис. 1. Пример измерений до и после контрастирования по протоколу MOLLI 5(3)3, используемых для расчета фракции внеклеточного объема

Fig. 1. Example of T1 measurements before and after intravenous contrast administration using the MOLLI 5(3)3 protocol for extracellular volume fraction calculation

выполняли отдельно для печени и селезенки в рамках каждого примененного протокола картирования. Показатели гематокрита в исследуемой выборке находились в физиологически допустимом диапазоне и не характеризовались выраженными различиями между стадиями фиброза, что исключает значимое влияние данного параметра на межгрупповое сопоставление ФВО.

В исследовании применялись два внеклеточных гадолинийсодержащих контрастных средства — гадопентетат димеглюмин (Магневист®) и гадодиамид (Омнискан®). Оба препарата характеризуются близкими значениями продольной релаксационности при напряженности магнитного поля 3 Тл — 3,8 и 3,9 $л \times ммоль^{-1} \times c^{-1}$ соответственно. Различие между указанными величинами не превышает 3%, что указывает на практически идентичные релаксационные свойства и не предполагает клинически значимого влияния типа контрастного средства на расчет ФВО в рамках данной работы. Контрастирование выполняли внутривенно болюсно в стандартной дозе 0,1 ммоль/кг массы тела с последующим введением 0,9% раствора натрия хлорида.

Статистическую обработку проводили в IBM SPSS 23.0. Данные представлены в виде медианы и межквартильного размаха. Межгрупповые различия оценивали с использованием критерия Крускала–Уоллиса (Kruskal-Wallis) с последующими попарными сравнениями по Манна–Уитни (Mann-Whitney). Диагностическую эффективность определяли методом ROC-анализа при разграничении классов А–В, В–С и А–С с расчетом площади под ROC-кривой

тельную (NPV) прогностическую ценность, а также пороги для стратегий исключения (rule-out) и подтверждения (rule-in). Для учета множественных сравнений применяли коррекцию Бенджамини–Хохберга (Benjamini-Hochberg) ($FDR < 0,05$).

Результаты. Анализ количественных МР-показателей печени и селезенки у пациентов с циррозом печени выявил статистически значимые различия в зависимости от класса по шкале Чайлд–Пью (табл. 1). При межгрупповом анализе по критерию Крускала–Уоллиса для всех количественных показателей выявлен статистически значимый эффект межгрупповых различий ($p \leq 0,009$), сохранявшийся после коррекции уровня значимости по методу Бенджамини–Хохберга ($FDR < 0,05$). Величина эффекта (ϵ^2) для всех количественных МР-показателей превышала порог крупного эффекта ($\epsilon^2 > 0,14$). Значения ϵ^2 составили 0,22–0,23 для T1-картирования печени, 0,17–0,24 для T1-картирования селезенки, 0,33–0,47 для ФВО селезенки и 0,63–0,67 для ФВО печени.

Для нативного T1-картирования печени по протоколу MOLLI 4(1)3(1)2 медианные значения последовательно увеличивались от 852,2 мс в классе А до 994,0 мс в классе С ($p = 0,002$; $FDR = 0,002$). Аналогичная направленность зарегистрирована для протокола MOLLI 5(3)3 ($p = 0,001$; $FDR = 0,002$). При попарном сопоставлении для нативного T1-картирования печени статистически значимые различия сохранялись при сравнении классов А–В и А–С по обоим протоколам ($FDR < 0,05$), тогда как различия между классами В–С статистической устойчивости не демонстрировали.

Таблица 1

Количественные МР-показатели печени и селезенки в зависимости от классов по шкале оценки тяжести и компенсации цирроза Чайлд-Пью

Table 1

Quantitative MRI parameters of the liver and spleen according to Child-Pugh classes of liver cirrhosis severity and compensation

Показатель	Чайлд-Пью А	Чайлд-Пью В	Чайлд-Пью С	Н	р	FDR
T1 печени, MOLLI 4(1)3(1)2, мс	852,2 [820,4; 910,4]	936,8 [911,5; 962,3]	994,0 [945,3; 1071,4]	13,12	0,002	0,002
T1 печени, MOLLI 5(3)3, мс	946,0 [899,5; 1004,2]	1004,0 [990,2; 1071,0]	1116,5 [1045,2; 1133,3]	12,55	0,001	0,002
T1 селезенки, MOLLI 4(1)3(1)2, мс	1255,5 [1203,4; 1321,8]	1350,7 [1284,6; 1412,3]	1383,7 [1315,2; 1470,6]	9,34	0,009	0,012
T1 селезенки, MOLLI 5(3)3, мс	1331,2 [1260,7; 1402,5]	1431,3 [1372,6; 1506,2]	1470,3 [1395,4; 1538,8]	12,56	0,002	0,004
ФВО печени, MOLLI 4(1)3(1)2, %	32,1 [31,6; 33,9]	37,5 [36,9; 37,7]	44,7 [44,3; 46,3]	32,35	<0,001	<0,001
ФВО печени, MOLLI 5(3)3, %	34,1 [32,6; 34,8]	39,4 [37,5; 40,7]	46,4 [45,3; 47,9]	30,22	<0,001	<0,001
ФВО селезенки, MOLLI 4(1)3(1)2, %	30,9 [30,4; 33,9]	37,3 [35,4; 40,2]	39,8 [37,2; 41,8]	23,84	<0,001	<0,001
ФВО селезенки, MOLLI 5(3)3, %	31,0 [30,1; 31,7]	35,8 [33,6; 37,8]	35,7 [34,9; 36,6]	17,05	<0,001	<0,001

Для нативного T1-картирования селезенки по протоколу MOLLI 4(1)3(1)2 медианные значения увеличивались от 1255,5 мс в классе А до 1383,7 мс в классе С (р=0,009; FDR=0,012). По протоколу MOLLI 5(3)3 значения изменялись с 1331,2 до 1470,3 мс (р=0,002; FDR=0,004). При попарном сопоставлении различия между классами В-С статистической устойчивости не демонстрировали.

ФВО печени характеризовалась наиболее выраженным межклассовым градиентом. По протоколу MOLLI 4(1)3(1)2 медианные значения возрастали с 32,1% в классе А до 44,7% в классе С (р<0,001; FDR<0,001). По протоколу MOLLI 5(3)3 — с 34,1% до 46,4% (р<0,001; FDR<0,001). При попарном анализе значений ФВО печени статистически значимые различия сохранялись для всех пар сравнения (А–В, В–С и А–С) по обоим протоколам T1-картирования (р≤0,004; FDR≤0,006) (рис. 2).

Для ФВО селезенки по протоколу MOLLI 4(1)3(1)2 медианные значения увеличивались с 30,9% в классе А до 39,8% в классе С (р<0,001; FDR<0,001). По протоколу MOLLI 5(3)3 значения составили 31,0% и 35,7% соответственно (р<0,001; FDR<0,001). При попарном сопоставлении различия между классами В-С статистической устойчивости не сохранялись.

Для количественной оценки дискриминативной способности исследуемых показателей при разграничении классов Чайлд-Пью выполнен ROC-анализ. При разграничении классов А и В ФВО печени демонстрировала наиболее высокую диагностическую эффективность. По протоколу MOLLI 4(1)3(1)2 AUROC для ФВО печени составила 0,985 (95% ДИ 0,944–1,000), по протоколу MOLLI

5(3)3 — 0,954 (95% ДИ 0,858–1,000). Нативное T1-картирование печени характеризовалось умеренной дискриминативной способностью: AUROC 0,747 и 0,728 соответственно. ФВО селезенки занимала промежуточное положение (AUROC 0,898 и 0,855). Для нативного T1-картирования селезенки AUROC составила 0,687 и 0,795 соответственно.

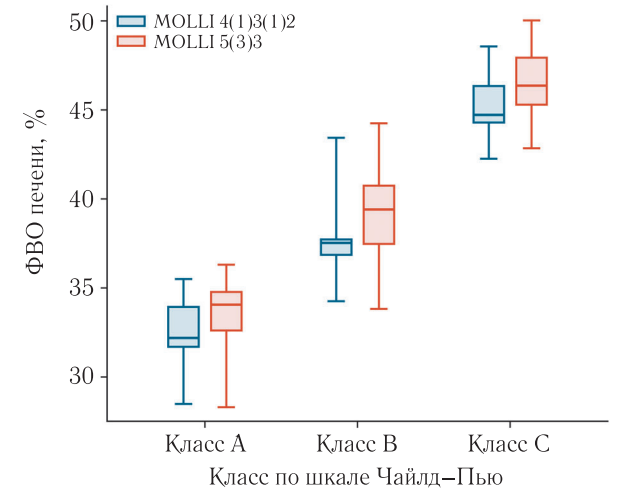


Рис. 2. Распределение значений фракции внеклеточного объема печени по классам шкалы Чайлд-Пью по данным протоколов MOLLI 4(1)3(1)2 и MOLLI 5(3)3

Fig. 2. Distribution of liver extracellular volume fraction across Child-Pugh classes using the MOLLI 4(1)3(1)2 and MOLLI 5(3)3 protocols

При разграничении классов В и С ФВО печени сохраняла высокую диагностическую эффективность по обоим протоколам (AUROC 0,986). Нативное T1-картирование печени демонстрировало более низкие

показатели (AUROC 0,718 и 0,776). ФВО селезенки характеризовалась умеренной дискриминативной способностью (AUROC 0,653 и 0,528), тогда как T1-картирование селезенки показало переменные и более низкие значения AUROC (0,705 и 0,436 соответственно).

Наиболее выраженное разграничение зарегистрировано при сравнении классов А и С. ФВО печени обеспечивала максимальную диагностическую эффективность (AUROC 1,000 по обоим протоколам). Нативное T1-картирование печени демонстрировало AUROC 0,899 и 0,893, а ФВО селезенки — 0,988 и 0,889. Для T1-картирования селезенки AUROC составила 0,857 и 0,833 соответственно (рис. 3).

обеспечивало $Se \geq 85\%$ и $Sp \geq 95\%$ при порогах 717 мс и 701 мс соответственно, тогда как для ФВО селезенки и T1-картирования селезенки одновременное достижение указанных показателей не обеспечивалось.

Прямое сравнение площадей под ROC-кривыми по тесту Делонга подтвердило статистически более высокую диагностическую эффективность ФВО печени по сравнению с нативным T1-картированием печени во всех вариантах попарного сопоставления классов Чайлд-Пью. Для протокола MOLLI 4(1)3(1)2 различия AUROC между нативным T1-картированием и ФВО печени составили $-0,238$ при сравнении классов А–В ($p < 0,001$), $-0,205$ при сравнении классов В–С ($p = 0,006$) и $-0,095$ при

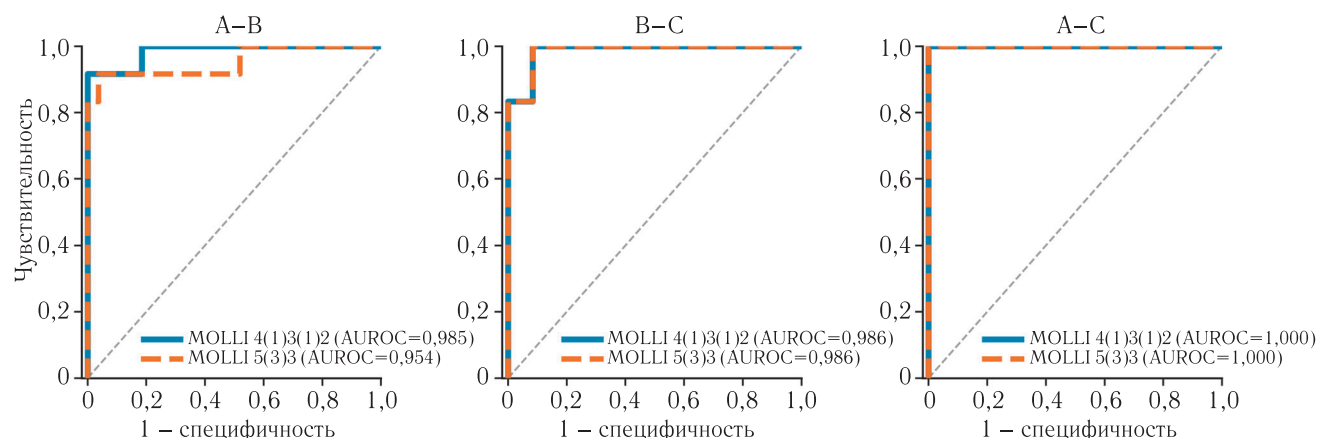


Рис. 3. ROC-кривые фракции внеклеточного объема печени при разграничении классов Чайлд-Пью А-В, В-С и А-С по данным протоколов MOLLI 4(1)3(1)2 и MOLLI 5(3)3

Fig. 3. ROC curves of liver extracellular volume fraction for discrimination between Child-Pugh classes A-B, B-C, and A-C using the MOLLI 4(1)3(1)2 and MOLLI 5(3)3 protocols

Анализ стратегий исключения и подтверждения принадлежности к более высокому классу Чайлд-Пью показал наибольшую стабильность ФВО печени. Для разграничения классов А и В по протоколу MOLLI 4(1)3(1)2 порог 35,52% обеспечивал одновременно чувствительность 91,7% и специфичность 100% (PPV 100%; NPV 96,4%). При использовании протокола MOLLI 5(3)3 специфичность составляла 96,3%, NPV — 96,3%. Сопоставление классов В и С также подтвердило высокую устойчивость показателя: ФВО печени позволяла реализовать стратегию подтверждения ($Sp = 100\%$) при порогах 45,10% и 45,70% соответственно (PPV 100%; NPV 92,3%). Максимальная диагностическая эффективность зарегистрирована при сравнении классов А и С: при пороговых значениях 40,6% (MOLLI 4(1)3(1)2) и 41,2% (MOLLI 5(3)3) достигались $Se = 100\%$ и $Sp = 100\%$ по обоим протоколам картирования.

Для нативного T1-картирования печени, ФВО селезенки и T1-картирования селезенки выполнение критериев $Se \geq 85\%$ и $Sp \geq 95\%$ зависело от сравниваемых классов. При разграничении А–В и В–С данные критерии не достигались. При сравнении А–С нативное T1-картирование печени

сравнении классов А–С ($p = 0,015$). Для протокола MOLLI 5(3)3 соответствующие различия составили $-0,226$ ($p < 0,001$), $-0,210$ ($p = 0,004$) и $-0,107$ ($p = 0,012$), что также подтверждало преимущество ФВО печени.

При сравнении ФВО селезенки и ФВО печени статистически значимое снижение AUROC для ФВО селезенки выявлено только при разграничении классов В–С по обоим протоколам T1-картирования: $\Delta AUROC$ составила $-0,333$ для MOLLI 4(1)3(1)2 ($p = 0,010$) и $-0,458$ для MOLLI 5(3)3 ($p < 0,001$). При сопоставлении классов А–В и А–С различия между ФВО селезенки и ФВО печени не были статистически значимыми.

Нативное T1-картирование селезенки демонстрировало умеренную дискриминативную способность при стратификации классов Чайлд-Пью, однако величины AUROC были ниже по сравнению с ФВО печени и сопоставимы либо несколько ниже значений, полученных для нативного T1-картирования печени. При попарном сравнении AUROC нативного T1-картирования селезенки и нативного T1-картирования печени статистически значимых различий не выявлено ($p > 0,05$ после FDR-коррекции), что

указывает на сопоставимую, но ограниченную прогностическую ценность данных параметров по сравнению с ФВО печени.

Прямое сравнение AUROC ФВО селезенки и нативного T1-картирования печени не выявило статистически значимых различий ни в одном варианте попарного сопоставления ($p \geq 0,109$; $FDR \geq 0,292$). Аналогичная закономерность отмечалась и при сопоставлении нативного T1-картирования селезенки с ФВО селезенки, где различия носили количественный, но не статистически значимый характер.

При корреляционном анализе выявлена статистически значимая положительная связь между суммарным баллом по шкале Чайлд-Пью и количественными МР-показателями (табл. 2). Наиболее высокая сила корреляции зарегистрирована для ФВО печени (ρ 0,879–0,892; $p < 0,001$; $FDR < 0,001$). Для ФВО селезенки коэффициент корреляции составил 0,632–0,709, для нативного T1-картирования печени — 0,589–0,602, а для нативного T1-картирования селезенки — 0,495–0,550.

печени, ФВО селезенки и T1-картирование селезенки демонстрировали более ограниченную диагностическую эффективность, прежде всего при разграничении смежных классов.

Последовательное увеличение медианных значений T1-картирования печени и ФВО печени по мере перехода от класса А к классу С отражает нарастание структурной перестройки паренхимы печени при нарастании печеночно-клеточной недостаточности. Для T1-картирования печени ограничение разделения смежных классов может быть связано с интегральной природой T1-релаксации и зависимостью показателя от совокупности факторов, включая объем внеклеточного матрикса, воспалительные изменения и жировую инфильтрацию, что ранее обсуждалось в контексте влияния тканевого состава на значения T1 печени [13, 14]. В отличие от этого, ФВО печени обеспечивала статистически значимые различия для всех пар сравнения и максимальные значения AUROC, включая полное разграничение классов А и С по обоим протоколам картирования,

Связь количественных МР-показателей с суммарным баллом по шкале оценки тяжести и компенсации цирроза Чайлд-Пью

Таблица 2

Table 2

Association between quantitative MRI parameters and the total score according to the Child-Pugh classification of liver cirrhosis severity and compensation

Показатель	Протокол	ρ	p	FDR
T1 печени	MOLLI 4(1)3(1)2	0,589	<0,001	<0,001
T1 печени	MOLLI 5(3)3	0,602	<0,001	<0,001
T1 селезенки	MOLLI 4(1)3(1)2	0,495	<0,001	<0,001
T1 селезенки	MOLLI 5(3)3	0,550	<0,001	<0,001
ФВО печени	MOLLI 4(1)3(1)2	0,879	<0,001	<0,001
ФВО печени	MOLLI 5(3)3	0,892	<0,001	<0,001
ФВО селезенки	MOLLI 4(1)3(1)2	0,632	<0,001	<0,001
ФВО селезенки	MOLLI 5(3)3	0,709	<0,001	<0,001

Во всех вариантах попарного сопоставления клинических классов цирроза печени по шкале Чайлд-Пью максимальные значения AUROC последовательно регистрировались для ФВО печени. Нативное T1-картирование печени демонстрировало более умеренную дискриминативную способность. ФВО селезенки характеризовалась промежуточными либо сниженными значениями AUROC в зависимости от сравниваемых классов, тогда как T1-картирование селезенки демонстрировало наименьшие и наиболее вариабельные показатели диагностической эффективности, особенно при разграничении смежных клинических классов.

Обсуждение. В настоящем исследовании показано, что количественные МР-показатели печени и селезенки характеризуются различной дискриминативной способностью при стратификации цирроза печени по классам шкалы Чайлд-Пью. Наиболее выраженные и устойчивые различия зарегистрированы для ФВО печени, тогда как T1-картирование

что согласуется с опубликованными данными о применении ФВО для оценки тяжести цирроза [15, 16].

Преимущество ФВО печени по сравнению с T1-картированием печени может быть объяснено большей биологической специфичностью показателя [17, 18]. Используемые внеклеточные контрастные препараты в поздней интерстициальной фазе распределяются преимущественно во внеклеточном пространстве, вследствие чего расчет ФВО основывается на фармакокинетически детерминированной модели распределения контрастного вещества и обеспечивает более прямую связь с морфологической перестройкой паренхимы печени, чем интегральные показатели T1. Дополнительным подтверждением клинической релевантности ФВО печени является высокая сила корреляции данного показателя с суммарным баллом по шкале Чайлд-Пью, превосходящая соответствующие коэффициенты для ФВО селезенки и показателей T1-картирования печени и селезенки [15, 16].

Селезенка является органом, структурные изменения которого при циррозе во многом обусловлены портальной гипертензией и гемодинамическими перестройками. ФВО селезенки демонстрировала межгрупповой градиент при переходе от класса А к классам В и С, однако при разграничении смежных классов ее дискриминативная способность была менее устойчивой, чем у ФВО печени. С учетом того, что шкала Чайлд-Пью преимущественно отражает функциональную оценку печени, полученные результаты позволяют предположить, что ФВО селезенки в большей степени отражает вклад системных гемодинамических изменений, чем нарастание печеночно-клеточной недостаточности [19]. Т1-картирование селезенки также демонстрировало статистически значимые межгрупповые различия и умеренную корреляцию с суммарным баллом по шкале Чайлд-Пью, однако его дискриминативная способность уступала ФВО печени и была наименее устойчивой при разграничении смежных клинических классов, что соответствует представлению о преимущественно вторичном характере изменений паренхимы селезенки при циррозе печени [12].

В совокупности полученные данные подтверждают, что ФВО печени является наиболее информативным количественным МР-показателем при стратификации цирроза печени по классам шкалы Чайлд-Пью. Т1-картирование печени, ФВО селезенки и Т1-картирование селезенки отражают дополнительные аспекты структурных и системных

изменений при циррозе печени, однако их вклад в разграничение клинических классов уступает ФВО печени, особенно при сравнении смежных групп.

Ограничения исследования. Исследование включало ограниченное число пациентов с циррозом печени. Распределение по классам Чайлд-Пью было неравномерным, что могло повлиять на устойчивость оценки дискриминативной способности показателей при сравнении смежных клинических групп. Оценка показателей выполнялась в рамках одного томографа и двух протоколов Т1-картирования, что ограничивает экстраполяцию результатов на другие платформы и импульсные последовательности Т1-картирования с иными параметрами и алгоритмами постпроцессинга.

Заключение. Фракция внеклеточного объема печени продемонстрировала наибольшую диагностическую эффективность при стратификации цирроза по классам шкалы оценки тяжести и компенсации цирроза Чайлд-Пью и обеспечивала устойчивое разграничение клинических групп.

Нативное Т1-картирование печени, ФВО селезенки и Т1-картирование селезенки характеризовались более ограниченной дискриминативной способностью, особенно при сравнении смежных классов, при этом показатели селезенки демонстрировали большую вариабельность и меньшую устойчивость диагностических характеристик по сравнению с ФВО печени.

Сведения об авторах:

Савченков Юрий Николаевич — кандидат медицинских наук, ассистент кафедры лучевой диагностики с курсом радиологии Медико-биологического университета инноваций и непрерывного образования федерального государственного бюджетного учреждения «Государственный научный центр Российской Федерации — Федеральный медицинский биофизический центр имени А. И. Бурназяна» Федерального медико-биологического агентства России; 123098, Москва, ул. Маршала Новикова, д. 23; заведующий отделением лучевой диагностики государственного бюджетного учреждения здравоохранения города Москвы «Городская клиническая больница имени В.П. Демихова Департамента здравоохранения города Москвы»; 109263, Москва, ул. Шкулева, д. 4; e-mail: yura_savchenkov@mail.ru; ORCID 0000-0002-8258-522X;

Труфанов Геннадий Евгеньевич — доктор медицинских наук, профессор, главный научный сотрудник НИО лучевой диагностики, заведующий кафедрой лучевой диагностики и медицинской визуализации с клиникой федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр имени В. А. Алмазова» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 197341, Санкт-Петербург, ул. Аккуратова, д. 2; e-mail: trufanovge@mail.ru; ORCID 0000-0002-1611-5000;

Фокин Владимир Александрович — доктор медицинских наук, профессор кафедры лучевой диагностики и медицинской визуализации с клиникой Института медицинского образования федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр имени В. А. Алмазова» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 197341, Санкт-Петербург, ул. Аккуратова, д. 2; e-mail: vladfokin@mail.ru; ORCID 0000-0002-2937-6322;

Ионова Елена Александровна — доктор медицинских наук, заведующий кафедрой лучевой диагностики с курсом радиологии Медико-биологического университета инноваций и непрерывного образования федерального государственного бюджетного учреждения «Государственный научный центр Российской Федерации — Федеральный медицинский биофизический центр имени А. И. Бурназяна» Федерального медико-биологического агентства России; 123098, Москва, ул. Маршала Новикова, д. 23; e-mail: ionela60@mail.ru; ORCID 0000-0002-6084-2061;

Савченкова Алина Петровна — врач-рентгенолог государственного бюджетного учреждения здравоохранения города Москвы «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы»; 127051, Москва, ул. Петровка, д. 24, стр. 1; e-mail: alinc-hik25@mail.ru; ORCID 0009-0005-0100-0306;

Просиков Валентин Андреевич — врач-рентгенолог отделения лучевой диагностики государственного бюджетного учреждения здравоохранения города Москвы «Городская клиническая больница имени В.П. Демихова Департамента здравоохранения города Москвы»; 109263, Москва, ул. Шкулева, д. 4; e-mail: prosikov92@mail.ru; ORCID 0009-0004-6719-4900;

Аракелов Сергей Эрнестович — доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой семейной медицины с курсом паллиативной медицинской помощи федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса

Лумумбы», главный врач государственного бюджетного учреждения здравоохранения города Москвы «Городская клиническая больница имени В. П. Демикова Департамента здравоохранения города Москвы»; 109263, Москва, ул. Шкулева, д. 4; e-mail: arakelov-s@yandex.ru; ORCID 0000-0003-3911-8543.

Information about the authors:

Yury N. Savchenkov — Cand. of Sci. (Med.), assistant of the Dept of Radiation Diagnostics with a course in Radiology Diagnostics at the Medical and Biological University of Innovation and Continuing Education of the Federal State Budgetary Institution «State Research Center — Burnazyan Federal Biophysical Medical Center of Federal Medical Biological Agency of Russia»; Head of the Dept of Radiation Diagnostics of the State Budgetary Healthcare Institution of Moscow «V. P. Demikhov City Clinical Hospital of the Moscow Department of Health»; 109263, Moscow, Shkuleva str., 4; e-mail: yura_savchenkov@mail.ru; ORCID 0000-0002-8258-522X;

Gennadiy E. Trufanov — Dr. of Sci. (Med.), Professor, Chief Researcher of the Research Institute of Radiation Diagnostics, Head of the Dept of Radiation Diagnostics and Medical Imaging with the clinic of the Federal State Budgetary Institution «Almazov National Medical Research Center» of the Ministry of Health of the Russian Federation; 197341, St. Petersburg, Akkuratova str., 2; e-mail: trufanovge@mail.ru; ORCID 0000-0002-1611-5000;

Vladimir A. Fokin — Dr. of Sci. (Med.), Professor of the Dept of Radiation Diagnostics and Medical Imaging with the clinic of the Federal State Budgetary Institution «Almazov National Medical Research Center» of the Ministry of Health of the Russian Federation; 197341, St. Petersburg, Akkuratova str., 2; e-mail: vladfokin@mail.ru; ORCID 0000-0002-2937-6322;

Elena A. Ionova — Dr. of Sci. (Med.), Professor, Head of the Dept of Radiation Diagnostics with a course in Radiology Diagnostics at the Medical and Biological University of Innovation and Continuing Education of the Federal State Budgetary Institution «State Research Center — Burnazyan Federal Biophysical Medical Center of Federal Medical Biological Agency of Russia»; 123098, Moscow, Marshala Novikova str., 23; e-mail: ionela60@mail.ru; ORCID 0000-0002-6084-2061;

Alina P. Savchenkova — radiologist at the State Budgetary Healthcare Institution of Moscow «Scientific and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Department of Health»; 127051, Moscow, Petrovka str., 24, building 1; e-mail: alinchik25@mail.ru; ORCID 0009-0005-0100-0306;

Valentin A. Pronikov — radiologist at the Dept of Radiation Diagnostics of the State Budgetary Healthcare Institution of Moscow «V. P. Demikhov City Clinical Hospital of the Moscow Department of Health»; 109263, Moscow, Shkuleva str., 4; e-mail: pronikov92@mail.ru; ORCID <https://orcid.org/0009-0004-6719-4900>;

Sergey E. Arakelov — Dr. of Sci. (Med.), Professor, Head of the Department of Family Medicine with a Palliative Care Course at the Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education, Chief Physician of the Moscow State Budgetary Healthcare Institution V. P. Demikhov City Clinical Hospital of the Moscow Department of Health; 109263, Moscow, Shkuleva str., 4; e-mail: arakelov-s@yandex.ru; ORCID 0000-0003-3911-8543.

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства, согласно международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распределен следующим образом: концепция и план исследования — Ю. Н. Савченков, Г. Е. Труфанов, В. А. Фокин, Е. А. Ионова, С. Э. Араkelов; сбор и анализ данных — Ю. Н. Савченков, А. П. Савченкова, В. А. Просиков; подготовка рукописи — Ю. Н. Савченков, Г. Е. Труфанов, В. А. Фокин.

Authors' contributions. All authors met the ICMJE authorship criteria (All authors made a significant contribution to the concept development, research and preparation of the article, read and approved the final version before publication). Special contribution: concept and design development — YuNS, GET, VAF, EAI, SEA; data collection and analysis — YuNS, APS, VAP; preparation of the manuscript — YuNS, GET, VAF.

Потенциальный конфликт интересов: авторы подтверждают отсутствие конфликта интересов, который необходимо обнародовать.

Disclosure: the authors confirm that there is no conflict of interest that needs to be made public.

Соответствие принципам этики: исследование одобрено локальным этическим комитетом ГБУЗ «ГКБ им. В. П. Демикова ДЗМ» (протокол № 4 от 19.11.2025). Информированное согласие получено от каждого пациента.

Adherence to ethical standards: the study was approved by the local ethics committee of the State Budgetary Healthcare Institution of Moscow «V. P. Demikhov City Clinical Hospital of the Moscow Department of Health» (protocol No. 4 of November 19, 2025). Informed consent was obtained from each patient.

Поступила/Received: 02.03.2026

Принята к печати/Accepted: 29.05.2026

Опубликована/Published: 29.06.2026

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Tham E.K.J., Tan D.J.H., Danpanichkul P. et al. The Global Burden of Cirrhosis and Other Chronic Liver Diseases in 2021 // *Liver Int.* 2025 Vol. 45. P. e70001. doi: 10.1111/liv.70001.
2. Cerrito L., Galasso L., Iaccarino J. et al. Present and Future Perspectives in the Treatment of Liver Fibrosis // *Pharmaceuticals*. 2025. Vol. 18, No. 9. P. 1321. doi: 10.3390/ph18091321.
3. Zeng X., Huang D., Zhu Z. et al. Mechanism-guided drug development and treatment for liver fibrosis: a clinical perspective // *Front. Pharmacol.* 2025 Vol. 16. P. 1574385. doi: 10.3389/fphar.2025.1574385.
4. Tarannum S., Ilyas T., Tarannum Shaik S. et al. Assessment of the Child-Pugh Score, Model for End-Stage Liver Disease Score, Fibrosis-4 Index, and AST to Platelet Ratio Index as Non-endoscopic Predictors of the Presence of Esophageal Varices and Variceal Bleeding in Chronic Liver Disease Patients // *Cureus*. 2024. Vol. 16, No. 11. P. e73768. doi: 10.7759/cureus.73768.
5. Costa F., Wiedenmann B., Roderburg C., Mohr R., Abou-Alfa G.K. Systemic treatment in patients with Child-Pugh B liver dysfunction and advanced hepatocellular carcinoma // *Cancer Med.* 2023. Vol. 12, No. 12. P. 12766–12778. doi: 10.1002/cam4.6033.
6. Huang W., Peng Y., Kang L. Advancements of non-invasive imaging technologies for the diagnosis and staging of liver fibrosis: Present and future // *VIEW*. 2024. doi: 10.1002/VIW.20240010.

7. Xue S., Zhu Y., Shao M. et al. T1/T2 mapping as a non-invasive method for evaluating liver fibrosis based on correlation of biomarkers: a preclinical study // *BMC Gastroenterol.* 2025. Vol. 25, No. 1. P. 122. doi: 10.1186/s12876-025-03701-9.
8. Serai S.D., Robson M.D., Tirkes T., Trout A.T. T1 Mapping of the Abdomen, From the AJR «How We Do It» Special Series // *AJR Am. J. Roentgenol.* 2025. Vol. 224. P. 6. doi: 10.2214/AJR.24.31643.
9. Mesrobian N., Chang J., Lutz P. et al. Clinical validation of T1ρ mapping for the assessment of hepatic fibrosis in patients with chronic liver disease // *Eur. Radiol.* 2025. doi: 10.1007/s00330-025-12225-5.
10. Obmann V.C., Ardoino M., Klaus J. et al. MRI Extracellular Volume Fraction in Liver Fibrosis-A Comparison of Different Time Points and Blood Pool Measurements // *J. Magn. Reson. Imaging.* 2024. Vol. 60, No. 4. P. 1678–1688. doi: 10.1002/jmri.29259.
11. Mesrobian N., Kupczyk P., Dold L. et al. Non-invasive assessment of liver fibrosis in autoimmune hepatitis: Diagnostic value of liver magnetic resonance parametric mapping including extracellular volume fraction // *Abdom. Radiol. (NY).* 2021. Vol. 46, No. 6. P. 2458–2466. doi: 10.1007/s00261-020-02822-x.
12. Mesrobian N., Isaak A., Faron A. et al. Magnetic resonance parametric mapping of the spleen for non-invasive assessment of portal hypertension // *Eur. Radiol.* 2021. Vol. 31, No. 1. P. 85–93. doi: 10.1007/s00330-020-07080-5.
13. Khan F., Dsouza S., Khamis A.H. et al. Noninvasive Assessment of the Severity of Liver Fibrosis in MASLD Patients with Long-Standing Type 2 Diabetes // *J. Gen. Intern. Med.* 2025. Vol. 40, No. 10. P. 2309–2318. doi: 10.1007/s11606-025-09348-2.
14. Higashi M., Tanabe M., Yamane M. et al. Impact of fat on the apparent T1 value of the liver: assessment by water-only derived T1 mapping // *Eur Radiol.* 2023. Vol. 33, No. 10. P. 6844–6851. doi: 10.1007/s00330-023-10052-0.
15. Mesrobian N., Kupczyk P.A., Dold L. et al. Assessment of liver cirrhosis severity with extracellular volume fraction MRI // *Sci Rep.* 2022. Vol. 8, No. 12. P. 9422. doi: 10.1038/s41598-022-13340-9.
16. Zhang H., Hao E., Xia D. et al. Estimating liver cirrhosis severity with extracellular volume fraction by spectral CT // *Sci Rep.* 2025. Vol. 26, No. 15. P. 18343. doi: 10.1038/s41598-025-03717-x.
17. Maino C., Vernuccio F., Cannella R. et al. Non-invasive imaging biomarkers in chronic liver disease // *Eur. J. Radiol.* 2024. Vol. 181. P. 111749. doi: 10.1016/j.ejrad.2024.111749.
18. Mazzola M., Cannella R., Pilato G. et al. Quantitative liver MRI biomarkers: what the radiologist should know // *J. Med. Imaging Interv. Radiol.* 2024. Vol. 11. P. 13. doi: 10.1186/s44326-024-00013-3.
19. Catucci D., Obmann V.C., Berzigotti A. et al. Noninvasive assessment of clinically significant portal hypertension using ΔT1 of the liver and spleen and ECV of the spleen on routine Gd-EOB-DTPA liver MRI // *Eur. J. Radiol.* 2021. Vol. 144. P. 109958. doi: 10.1016/j.ejrad.2021.109958.

Открыта подписка на 2-е полугодие 2026 года.

Подписной индекс:

«Урал Пресс» (Пресса России) **014023**

УДК 618.19-006.2/3-089.87-073.43

<http://doi.org/10.22328/2079-5343-2026-17-2-61-73>

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ СЕМИОТИКА ИЗМЕНЕНИЙ МОЛОЧНЫХ ЖЕЛЕЗ ПОСЛЕ МАЛОИНВАЗИВНОГО ХИРУРГИЧЕСКОГО ЛЕЧЕНИЯ ДОБРОКАЧЕСТВЕННЫХ НОВООБРАЗОВАНИЙ: НАБЛЮДАТЕЛЬНОЕ АНАЛИТИЧЕСКОЕ ПРОСПЕКТИВНОЕ КОГОРТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

^{1,2}Е. А. Марущак[✉], ²Е. А. Зубарева[✉], ¹Е. П. Фисенко[✉]¹Российский научный центр хирургии имени академика Б. В. Петровского, Москва, Россия²Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н. И. Пирогова, Москва, Россия

ВВЕДЕНИЕ: Рост заболеваемости доброкачественными новообразованиями молочных желез (МЖ), а также совершенствование и активное внедрение в хирургическую практику новых высокотехнологичных оперативных методик привело к увеличению количества резекций, выполняемых с помощью технологии вакуумной аспирационной биопсии (ВАБ). Возможности ВАБ постоянно расширяются: в настоящее время успешно и безопасно проводится резекция крупных и множественных новообразований, что обусловлено в том числе совершенствованием методологии выполнения на разных этапах процедуры ультразвукового исследования (УЗИ), являющегося ее неотъемлемой частью.

ЦЕЛЬ: Изучение ультразвуковой семиотики изменений молочной железы в разные сроки после вакуумной аспирационной резекции доброкачественных новообразований.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ: За период 2017–2024 гг. включительно в дневном стационаре НКЦ № 2 РНЦ им. акад. Б. В. Петровского (ранее ЦКБ Российской академии наук) были выполнены ВАБ под контролем ультразвукового исследования 986 пациенткам. Всего было удалено 1433 новообразования. Количество одновременно удаляемых новообразований у одной пациентки варьировало от 1 до 7. Размер удаляемых образований достигал максимально 54 мм. Помимо интраоперационного УЗИ, пациенткам выполняли динамические исследования после операции: на 1-е сутки (все пациентки), а также в отдаленном периоде (1 контрольное УЗИ — 273 пациентки; 2 и более контрольных УЗИ — 47 пациенток).

Статистика: анализ данных выполняли с использованием программного обеспечения Excel 2019 (Microsoft, США) и JMP Pro 17 (SAS, США).

РЕЗУЛЬТАТЫ: УЗИ в раннем послеоперационном периоде было выполнено всем 986 пациенткам, у которых в общей сложности было удалено 1433 новообразования МЖ. Количество геморрагических осложнений, представленных гематомами размерами от 1,5 до 3 см, составило 2,63% (26 пациенток). После 1-го динамического УЗИ остаточная ткань удаленного новообразования первично была заподозрена у 83 из 319 явившихся на него женщин (83 остаточных фрагмента на 490 удаленных новообразований, что составило 16,93%). В дальнейшем при динамических УЗИ это процент снизился до 14,28% (70 случаев) — у 13 пациенток остаточная ткань была исключена при исследовании в более поздние сроки. Выполнение УЗИ в динамике у пациенток с подозрением на остаточную ткань при исследовании в сроки до 6 месяцев от операции позволило в более поздние сроки исключить солидное образование во 2-й группе пациенток в 29% случаев.

ОБСУЖДЕНИЕ: Основной задачей УЗИ в ранние сроки после операции являлся контроль геморрагических осложнений, дифференцировка же вероятной остаточной ткани новообразования на фоне отека затруднена и должна выполняться в более поздние сроки. Характерной картиной изменений ткани МЖ в течение первых месяцев после вмешательства является наличие гипозоногенной «незрелой» рубцовой ткани в ложе, часто имеющей звездчатую форму и затрудняющей дифференцировку вероятной остаточной ткани новообразования. В течение следующих месяцев ткани в области ложа становятся более компактными по размерам и контурам, эхогенность их повышается, а структура более соответствует соединительной ткани. К 6-му месяцу можно наблюдать различные варианты исхода репаративных процессов в области операции, отличающиеся значительной вариабельностью: от практически интактной ткани, соответствующей неизменной железе (что наблюдается в большинстве случаев после ВАБ), до формирования различных по форме и структуре рубцов. В эти сроки на фоне хорошей визуализации возможно убедительно дифференцировать вероятную остаточную ткань новообразования. Наиболее сложными в плане дифференциальной диагностики при УЗИ являются структурные изменения в ложе опухоли, представляющие собой гипозоногенное образование неправильной звездчатой формы, имитирующее злокачественное новообразование.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ: Для ультразвуковой семиотики структурных изменений МЖ на различных этапах ВАБ характерны особенности, связанные как с технологией вмешательства, так и с ходом заживления ложа удаленного новообразования. Знание вариабельности ультразвуковой картины в разные сроки после выполнения ВАБ и выполнение УЗИ в динамике помогает избежать диагностических ошибок в части дифференцировки остаточной ткани или рецидива новообразования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ультразвуковая диагностика; молочная железа; ВАБ; вакуумная аспирационная биопсия; ультразвуковая семиотика; послеоперационные изменения

* Для корреспонденции: Марущак Елена Александровна, e-mail: e.marushchak@mail.ru

Для цитирования: Марущак Е.А., Зубарева Е.А., Фисенко Е.П. Ультразвуковая семиотика изменений молочных желез после малоинвазивного хирургического лечения доброкачественных новообразований: наблюдательное аналитическое проспективное когортное исследование // *Лучевая диагностика и терапия*. 2026. Т. 17, № 2. С. 61–73, doi: <http://doi.org/10.22328/2079-5343-2026-17-2-61-73>.

ULTRASONIC SEMIOTICS OF BREAST CHANGES AFTER MINIMALLY INVASIVE SURGICAL TREATMENT OF BENIGN NEOPLASMS: A OBSERVATIONAL ANALYTICAL: A PROSPECTIVE COHORT STUDY

^{1,2}Elena A. Marushchak^{*}, ²Elena A. Zubareva[®], ¹Elena P. Fisenko[®]

¹Petrovsky Russian Research Center of Surgery, Moscow, Russian

²Pirogov Russian National Research Medical University, Moscow, Russia

INTRODUCTION: The increase in the incidence of benign breast tumors, as well as the improvement and active introduction of new high-tech surgical techniques into medical practice, has led to an increase in the number of resections performed using vacuum aspiration biopsy (VAB) technology. The capabilities of VAB are constantly expanding: large and multiple tumors can now be successfully and safely resected, thanks in part to the improvement of ultrasound (US) methodology at various stages of the procedure, which is an integral part of the procedure.

OBJECTIVE: is to examine the ultrasound semiotics of breast changes at different time intervals after vacuum aspiration resection of benign neoplasms.

MATERIALS AND METHODS: For the period 2017–2024 inclusive in the day hospital of NCC No. 2 of the Russian National Research Center named after Academician B. V. Petrovsky (formerly the Central Design Bureau of the Russian Academy of Sciences) performed ultrasound-controlled VAB in 986 patients. A total of 1,433 neoplasms were removed. The number of simultaneously removed neoplasms in one patient ranged from 1 to 7. The size of the removed formations reached a maximum of 54 mm. In addition to intraoperative ultrasound, the patients underwent dynamic studies after surgery: on the 1st day (all patients), as well as in the long-term period (1 follow-up ultrasound — 273 patients; 2 or more follow-up ultrasounds — 47 patients).

Statistics: data analysis was performed using Excel 2019 (Microsoft, USA) and JMP Pro 17 (SAS, USA) software.

RESULTS: Ultrasound was performed in the early postoperative period in all 986 patients, who had a total of 1433 breast neoplasms removed. The number of hemorrhagic complications, represented by hematomas ranging from 1.5 to 3 cm in size, was 2.63% (26 patients). After the 1st dynamic ultrasound, residual tissue of the removed neoplasm was initially suspected in 83 of the 319 women who attended the examination (83 residual fragments out of 490 removed neoplasms, which accounted for 16.93%). Subsequently, during dynamic ultrasounds, this percentage decreased to 14.28% (70 cases) — in 13 patients, residual tissue was excluded during later examinations. Performing ultrasound scans in patients with suspected residual tissue up to 6 months after surgery allowed for the exclusion of solid tumors in 29% of cases in the second group of patients.

DISCUSSION: The main objective of ultrasound in the early postoperative period was to control hemorrhagic complications, while the differentiation of the possible residual tumor tissue against the background of edema is difficult and should be performed at a later time. A characteristic pattern of changes in the breast tissue during the first months after the intervention is the presence of hypoechoic «immature» scar tissue in the bed, often having a star-shaped appearance and making it difficult to differentiate the possible residual tumor tissue. Over the following months, the tissues in the bed area become more compact in size and contour, their echogenicity increases, and their structure becomes more consistent with connective tissue. By the 6th month, various outcomes of the reparative processes in the surgical area can be observed, with significant variability: from almost intact tissue corresponding to the unchanged gland (which is observed in most cases after VAB), to the formation of scars with different shapes and structures. At this time, it is possible to convincingly differentiate the likely residual tissue of the neoplasm against the background of good visualization. The most difficult in terms of differential diagnosis in ultrasound are structural changes in the tumor bed, which are a hypoechoic formation of an irregular stellate shape, mimicking a malignant neoplasm.

CONCLUSION: The ultrasound semiotics of structural changes in the mammary glands at various stages of breast-conserving surgery have specific features related both to the intervention technology and to the course of healing of the bed of the removed neoplasm. Knowledge of the variability of the ultrasound picture at different times after performing breast-conserving surgery and performing ultrasound in dynamics helps to avoid diagnostic errors in terms of differentiation of residual tissue or recurrence of the neoplasm.

KEYWORDS: ultrasound diagnostics; breast; VAB; vacuum aspiration biopsy; ultrasound semiotics; postoperative changes

* For correspondence: Elena A. Marushchak, e-mail: e.marushchak@mail.ru

For citation: Marushchak E.A., Zubareva E.A., Fisenko E.P. Ultrasonic semiotics of breast changes after minimally invasive surgical treatment of benign neoplasms: a observational analytical: a prospective cohort study // *Diagnostic radiology and radiotherapy*. 2026. Vol. 17, No. 2. P. 61–73, <http://doi.org/10.22328/2079-5343-2026-17-2-61-73>.

Введение. В настоящее время изучение доброкачественных новообразований молочных желез (МЖ) у женщин остается актуальной проблемой, что обусловлено их значительной распространенностью, ростом заболеваемости во всех возрастных группах, а также возможностью малигнизации. Так, у женщин в возрасте до 30 лет их частота составляет 25%, старше 40 лет — достигает 50% [1–3]. А. П. Надеев и соавт. на основании результатов 3380 биоптатов МЖ определили, что доброкачественные опухоли преобладали у женщин в возрасте от 20 до 49 лет, а самым распространенным гистологическим вариантом при этом являлась фибroadенома (71%) [4]. Кроме того, у многих женщин доброкачественные новообразования МЖ имеют быстрый рост, сопровождаются болевыми ощущениями, а также психологическим и эстетическим дискомфортом [5]. Другую распространенную группу доброкачественных заболеваний МЖ составляет доброкачественная дисплазия МЖ (ДДМЖ), объединяющая ряд заболеваний, которые имеют многообразную клиническую и морфологическую картину и «...характеризуются широким спектром пролиферативных и регрессивных изменений тканей молочной железы». Ее частота составляет более 50%, а в репродуктивном возрасте достигает 75–80%. Максимальная заболеваемость регистрируется в возрасте 40–44 лет, с последующим медленным снижением к 65 годам. Некоторые формы ДДМЖ ассоциированы с повышенным риском развития рака МЖ и согласно национальным клиническим рекомендациям, ряд вариантов ДДМЖ подлежит оперативному лечению (среди них атипичная протоковая, плоская и дольковая эпителиальная гиперплазия, радиальный рубец и другие формы) [5]. В рекомендациях зарубежных медицинских сообществ показания еще шире, учитывают факторы риска, такие как носительство мутаций в генах BRCA 1, BRCA 2, отягощенный семейный анамнез по раку МЖ, предстоящие процедуры экстракорпорального оплодотворения [6].

Таким образом, востребованность хирургического лечения доброкачественных новообразований МЖ и ДДМЖ не только не теряет свою актуальность, но и является основным двигателем в развитии и все большем распространении малоинвазивных вариантов операций. Одним из самых успешных и высокотехнологичных способов удаления образований МЖ является вакуумная аспирационная биопсия (ВАБ), прошедшая эволюционный путь от диагностического пособия до объема полной эксцизии опухоли [7, 8]. Эта методика, помимо высокой эффективности и безопасности, обладает значительными преимуществами перед традиционными открытыми вмешательствами, среди которых самыми значимыми для женщин является отличный косметический эффект и отсутствие периода реабилитации [8–12]. Так, Y. Jiang и соавт. приводят данные выполненных 4867

процедур ВАБ под ультразвуковым контролем, в результате которых были удалены доброкачественные новообразования МЖ размерами от 6 до 62 мм в среднем за 10,3 мин, при этом полное иссечение было достигнуто в 99,7%, а частота рецидивов составила всего 4,4% [13]. R. A. Cochrane и соавт. обнаружили, что косметический эффект и удовлетворенность пациенток после органосохраняющей операции коррелируют с процентом удаленного объема МЖ: наилучший косметический эффект и удовлетворенность наблюдались при удалении менее 10% объема органа, что соответствует объему ВАБ [14]. A. Lakota и соавт. высказывают предположение о том, что, учитывая положительный профиль эффективности и безопасности, а также косметический результат, экономическую эффективность и техническую простоту процедуры, ВАБ может стать новым «золотым стандартом» хирургического лечения доброкачественных опухолей МЖ [8].

Одной из актуальных проблем остается трактовка ультразвуковой картины МЖ после выполнения процедуры ВАБ, имеющая свои особенности на разных сроках после вмешательства [15]. Наиболее важной задачей ультразвукового исследования (УЗИ) является констатация наличия или отсутствия геморрагических осложнений в момент и после завершения ВАБ, оценка объема удаленной ткани и верификация остаточной ткани опухоли в отдаленный период, процент которой по данным ряда авторов соответствует 3–5% [11–13]. P. Thurley и соавт. приводят данные о том, что при динамических УЗИ в послеоперационном периоде в 30% случаев выявлялась остаточная опухоль [16]. Важной задачей УЗИ в отдаленном послеоперационном периоде является дифференцировка рубцовых изменений в ложе новообразования и рецидива опухоли с учетом ее вероятной злокачественности [17]. Однако в настоящий момент не существует общепринятого и строго определенного набора «ультразвуковых семиотических» признаков для конкретного состояния ткани МЖ в разные сроки после выполнения ВАБ-резекции.

Цель. Изучение ультразвуковой картины изменений тканей МЖ в разные сроки после ВАБ-резекции доброкачественных новообразований.

Материалы и методы. Исследование было одобрено локальным этическим комитетом РНЦХ им. акад. Б. В. Петровского (протокол № 5 от 23 мая 2025). Информированное согласие получено от каждого пациента.

С 2017 по 2024 г. включительно в ФГБНУ РНЦХ им. акад. Б. В. Петровского (ранее Центральная клиническая больница Российской академии наук — ЦКБ РАН) были выполнены ВАБ под контролем интраоперационного УЗИ 986 пациенткам. В настоящее исследование вошли пациентки с выполненными динамическими УЗИ в ранние (тогдаш после процедуры, 1-е сутки после процедуры)

и отдаленные сроки после оперативного вмешательства. Согласие пациенток на осмотр, медицинское вмешательство, обработку данных получено. Все новообразования МЖ у пациенток, направляемых на ВАБ с лечебной целью, ранее были морфологически верифицированы как доброкачественные. В исследование не вошли пациентки с верифицированным раком молочной железы, моложе 18 лет, а также пациенты мужского пола.

Возраст пациенток составил от 18 до 81 года (медиана 37 [31; 44] лет). У 986 пациенток было удалено 1433 новообразования МЖ. Количество одновременно удаляемых новообразований у одной пациентки составляло от 1 до 7 в одной МЖ. Количество пациенток с удаленным единичным новообразованием составило 715, с двумя — 167, с тремя и более — 104. Из них операции на одной молочной железе выполнены у 877 женщин, на 2 одновременно — у 109 женщин. Размер образований при этом варьировал от небольших (до 10 мм) до максимально достигающих 54 мм по длинной оси (медиана 13,0 [10,0; 18,0] мм).

В последующем всем пациенткам выполняли динамическое УЗИ в раннем послеоперационном периоде на 1-е сутки после операции (явка на данное УЗИ составила 100%). 319 пациенткам (32,35% из 986 оперированных женщин) выполнено УЗИ в отдаленном послеоперационном периоде. Из них одно контрольное УЗИ проведено у 273 (85,57%) пациенток (группа 1); 2 и более контрольных УЗИ — у 47 (14,73%) пациенток (группа 2). Следует отметить, что всем пациенткам было рекомендовано выполнение УЗИ в отдаленном послеоперационном периоде, однако хотя бы на одно исследование явились только 319 человек, которые и составили группы 1 и 2.

В группе 1 сроки УЗИ составили от 1 до 60 месяцев. В группе 2 контрольное УЗИ выполняли минимум дважды. Сроки первого УЗИ составили от 1 до 14 месяцев, повторного — от 6 до 60 месяцев.

Все УЗИ на разных этапах и сроках лечения выполняли на УЗ-сканерах VolusonE8 Expert (General Elektrik, США) с использованием матричного мультимастотного линейного датчика ML 6–15 МГц и Canon Aplio I900 (Canon, Япония) с использованием линейного мультимастотного матричного датчика i18LX5 6–18 МГц. Помимо серошкального В-режима использовали режимы цветового доплеровского картирования, энергического картирования, (ЦДК, ЭДК), оценки микроваскуляризации (SMI) и компрессионной эластографии. При выполнении УЗИ описывалась УЗ-картина для каждой области ВАБ-резекции новообразования в каждой оперированной МЖ; при этом интерпретация данных не менялась в зависимости от объема вмешательства.

ВАБ-резекции выполняли роботизированными зондами-иглами 7 или 10 G под контролем УЗИ

на маммотоме второго поколения EnCorENSPiRE (BARD, США).

В качестве способа профилактики геморрагических осложнений использовалась лазерная интерстициальная коагуляция с помощью аппарата лазерного хирургического МЕДИОЛА-АЛМОХ-0,1/0,25-«ЛАМИ», ООО «Опттехника» (Россия).

Статистический анализ данных выполняли с использованием программного обеспечения Excel 2019 (Microsoft, США) и JMP Pro 17 (SAS, США). Количественные показатели описывали в виде медианы квартилей, среднего значения, минимального и максимального значения. Качественные признаки представлены в виде долей и частот выявления признака (%).

Результаты.

1. Задачи УЗИ и ультразвуковая картина в ранние сроки после ВАБ-резекции доброкачественных новообразований молочной железы. Тотчас после выполнения ВАБ-резекции новообразования проводили оценку состояния ткани МЖ в ложе удаленной опухоли путем полипозиционного УЗИ на предмет отсутствия кровотечения и полного удаления ткани. УЗ-картина МЖ в зоне резекции при этом соответствует диффузному отеку ткани в виде понижения ее эхогенности без четких границ и контуров, без наличия патологических отграниченных жидкостных и солидных включений (рис. 1, а). При выполнении интраоперационного гемостаза с использованием лазерной коагуляции под контролем УЗИ в режиме реального времени тотчас после резекции условия УЗ-визуализации улучшаются. Данный эффект обусловлен тем, что после коагуляции ложа удаленного образования происходит вапоризация жидкости (в том числе и анестетика), хорошо контролируемая при УЗИ путем визуализации эхогенных полос (рис. 1, б).

После выполнения гемостаза менее выражен отек тканей, что позволяет более точно оценить ложе и, в случае необходимости, выполнить дополнительные туры режущей иглой в зонах, вызывающих сомнение на предмет остаточной ткани. После этого накладывается эластическая компрессия, и следующее УЗИ выполняется на другой день после операции.

Задачи УЗИ на следующий день после операции прежние: контроль геморрагических осложнений и наличия остаточной ткани удаленного новообразования. Однако при выполнении УЗИ в эти сроки ткани МЖ в зоне резекции по-прежнему отечны, при этом явления отека в первые сутки могут нарастать, что затрудняет дифференцировку и в ряде случаев может создать ложную картину наличия фрагмента опухоли. Кроме того, детальное УЗИ в ранний послеоперационный период затруднено болевыми ощущениями пациентки, сохраняющимся в небольшом количестве включением пузырьков газа после вапоризации и наличием повязок в местах ввода роботизированной иглы, а именно эти зоны пред-

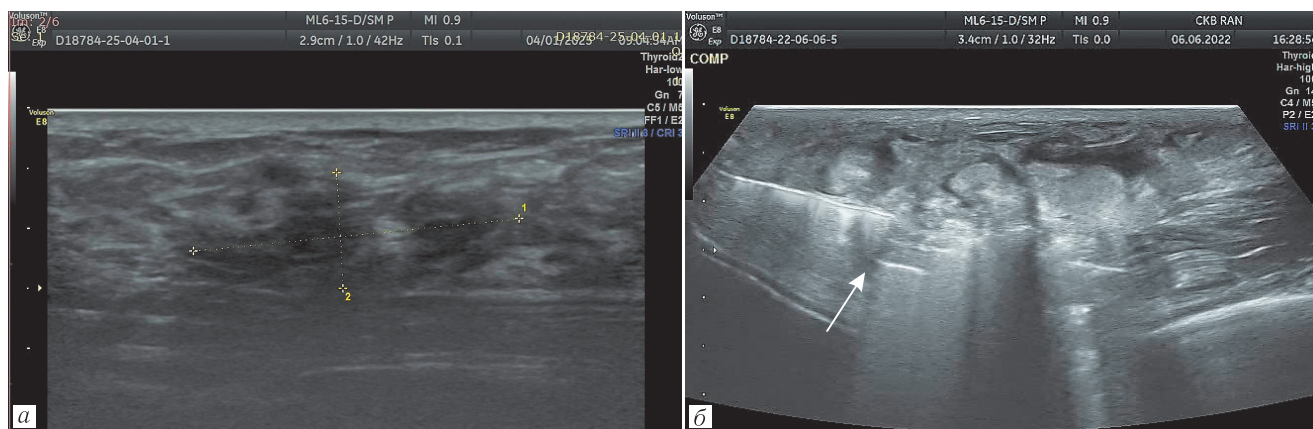


Рис. 1. Интраоперационное УЗИ. УЗ-картина изменений молочной железы в зоне оперативного вмешательства: *а* — отек ткани молочной железы в зоне операции (желтые метки); *б* — УЗ-картина vaporизации жидкости при осуществлении гемостаза путем лазерной коагуляции (стрелка)

Fig. 1. Intraoperative ultrasound. Ultrasound image of breast changes in the surgical area: *a* — swelling of the breast tissue in the surgical area (yellow marks); *б* — ultrasound image of fluid vaporization during hemostasis by laser coagulation (arrow)

ставляют наибольший интерес для визуализации. Также в первые дни после операции может наблюдаться диффузное усиление васкуляризации ткани МЖ в зоне резекции.

Гематомы МЖ в ложе удаленных новообразований визуализируются как анэхогенные или гипозоногенные образования с четкими границами, размеры которых уменьшаются со временем, и могут быть представлены как жидкой кровью, так и сгустками (рис. 2).

сложности было удалено 1433 новообразования МЖ. Количество геморрагических осложнений, представленных гематомами размерами от 1,5 до 3 см, составило 2,63% (26 пациенток).

2. Задачи УЗИ и ультразвуковая картина в отдаленные сроки после ВАБ-резекции доброкачественных новообразований молочной железы. Задачами УЗИ в отдаленном послеоперационном периоде является контроль остаточной

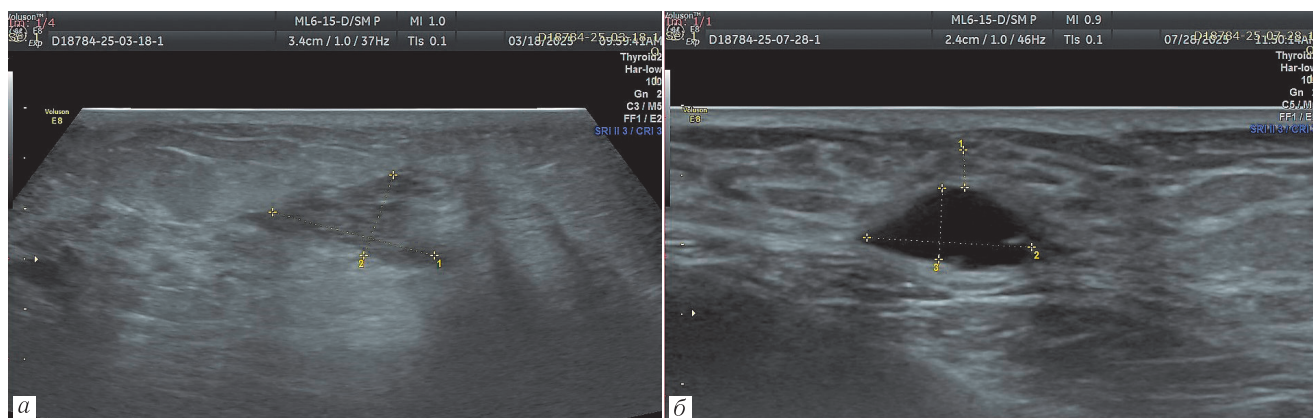


Рис. 2. УЗ-картина гематом в раннем послеоперационном периоде (пояснения в тексте): *а* — гематома с формированием сгустков (желтые метки); *б* — гематома, представленная жидкостью (желтые метки)

Fig. 2. Ultrasound image of hematomas in the early postoperative period (explained in the text): *a* — hematoma with clot formation (yellow marks); *б* — hematoma with fluid (yellow marks)

Таким образом, основной задачей УЗИ тотчас после операции является контроль геморрагических осложнений и полноты выполнения резекции ткани опухоли, чему способствует улучшение условий УЗ-визуализации на фоне применения лазерной коагуляции. На следующий день после операции задачи УЗИ ограничиваются в основном контролем геморрагических осложнений, а исключение остаточной ткани должно выполняться в более поздние сроки.

УЗИ в раннем послеоперационном периоде было выполнено всем 986 пациенткам, у которых в общей

ткани новообразования, а также оценка рубцовых изменений в его ложе. Регресс отека позволяет выполнить тщательный полипозиционный осмотр ткани МЖ.

В группе 1, где было выполнено только 1 УЗИ, остаточная ткань была заподозрена у 38 пациенток из 272 (13,97%). Размеры предполагаемой остаточной ткани составили от 5 мм до 39 мм. Сроки УЗИ составили от 1 до 60 месяцев. Из них выполнение УЗИ в сроки до 6 месяцев было у 11 пациенток, более 6 месяцев — у 27 пациенток. У 11 пациенток,

у которых наличие остаточной ткани не вызывало сомнений, в том числе с учетом того, что УЗИ выполнено в сроки более 6 месяцев после операции, была проведена повторная ВАБ-резекция с целью ликвидации остаточной ткани. У 10 пациенток были подтверждены фрагменты фиброаденомы, у 1 — фиброзная ткань. Еще 11 пациенткам с учетом сроков УЗИ, выполненного до 6 месяцев после операции, и отсутствием убедительных признаков остаточной ткани, было рекомендовано повторить УЗИ в динамике, однако пациентки на повторное исследование не явились. Остальные 16 пациенток с явными признаками наличия остаточной ткани при УЗИ в сроки более 6 месяцев отказались от предложенного повторного оперативного вмешательства и не явились на повторное УЗИ.

В группе 2 (47 пациенток) контрольное УЗИ выполнялось минимум дважды. Сроки первого УЗИ составили от 1 до 14 месяцев. Из них при первом

до 60 месяцев) остаточная ткань была исключена у 13 пациенток из 45 (28,88%). Следует отметить, что у всех этих пациенток первое УЗИ было выполнено в сроки до 6 месяцев, что свидетельствует о высокой частоте гипердиагностики резидуального солидного образования в этот период. У 32 пациенток наличие остаточной ткани при повторном исследовании было подтверждено (размеры остаточной ткани составили от 5 мм до 39 мм). У половины (16 пациенток) из них выполнили повторную ВАБ-резекцию, верифицированы фрагменты фиброаденомы. Другие 16 пациенток от предложенного повторного оперативного лечения отказались. У 2 из 47 пациенток при первом УЗИ, выполненном в сроки до 6 месяцев, остаточная ткань при первичном УЗИ, напротив, не визуализировалась, однако была выявлена при втором исследовании в более поздние сроки, что требует дифференцировать данную ситуацию с рецидивом новообразования.

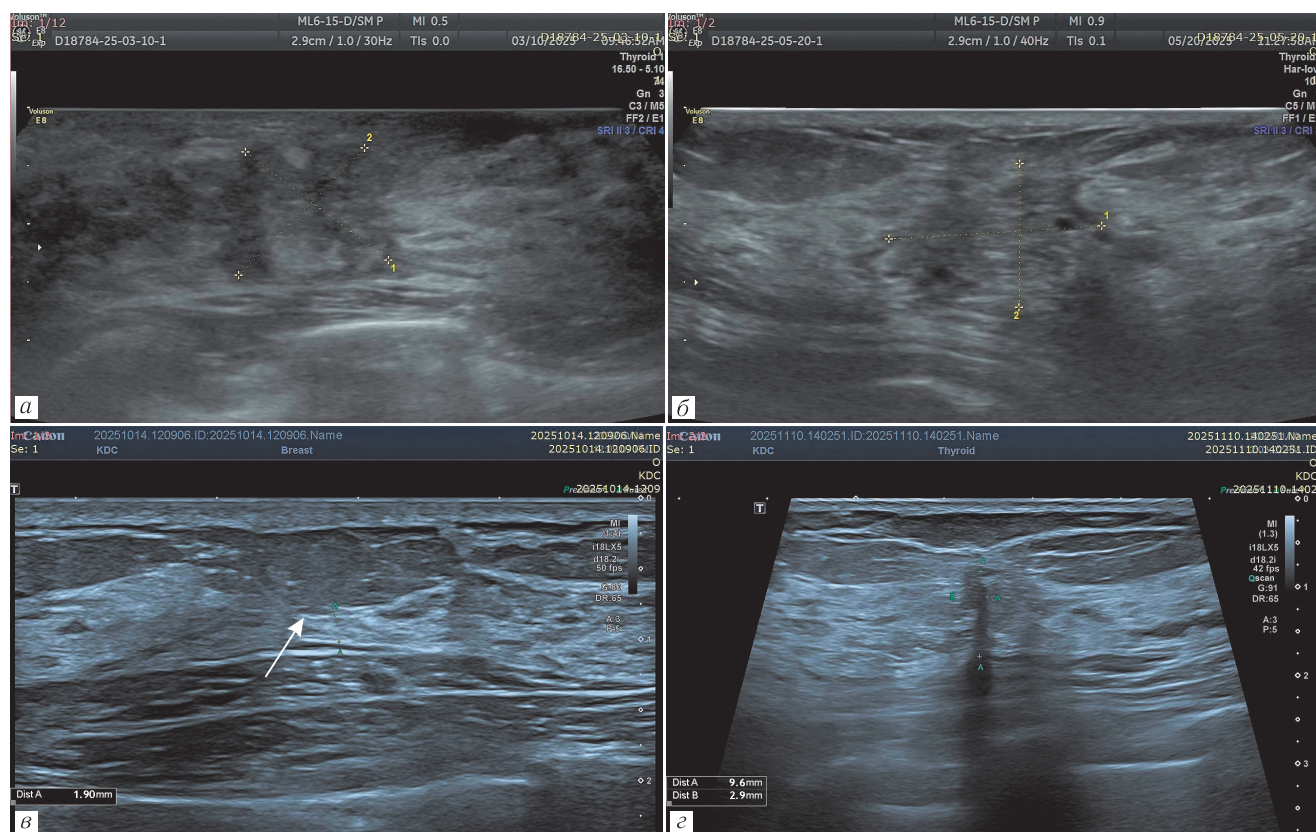


Рис. 3. Ультразвуковая картина изменений ткани молочной железы в зоне выполнения ВАБ в отдаленный послеоперационный период (пояснения в тексте): а — «незрелый» рубец в зоне операции (желтые метки); б — динамика структурных изменений рубца со временем (желтые метки); в — ниша в glandулярной ткани в зоне резекции образования (стрелка); г — тонкий рубец в зоне резекции (метки)

Fig. 3. Ultrasound image of changes in breast tissue in the area of VAB in the late postoperative period (explained in the text): а — «immature» scar in the surgical area (yellow marks); б — dynamics of scar structural changes over time (yellow marks); в — glandular tissue niche in the resection area (arrow); г — thin scar in the resection area (marks)

УЗИ остаточная ткань была заподозрена у 45 пациенток (95,74%), что послужило рекомендацией к выполнению повторного УЗИ в более поздние сроки и обусловило заинтересованность и практически 100% явку пациенток этой группы на повторное исследование. При втором УЗИ (сроки от 6

Таким образом, после 1-го контрольного УЗИ остаточная ткань удаленного новообразования первично была заподозрена у 83 из 319 женщин (83 остаточных фрагмента на 490 удаленных новообразований, что составило 16,93%). В дальнейшем при динамических УЗИ это процент снизился до 14,28%

(70 случаев), так как у 13 пациенток остаточная ткань была исключена при повторном исследовании в более поздние сроки. Кроме того, 11 пациенток группы 1, у которых УЗИ было выполнено в сроки до 6 месяцев после операции и наличие остаточной ткани требовало подтверждения при динамическом исследовании, на него не явились.

В результате проведенного динамического наблюдения за пациентками после выполнения ВАБ отмечено, что УЗ-картина тканей МЖ в зоне резекции значительно варьировала в зависимости от времени, прошедшего после вмешательства. В ранние сроки наблюдали структурную неоднородность, обусловленную отеком, воспалительной реакцией и элементами гематомы. Затем постепенно происходило формирование рубцовой ткани, которая также имела различную УЗ-картину в зависимости от сроков, прошедших с момента операции. Так, «незрелый» рубец, особенно в первые месяцы после операции, имел неправильную звездчатую форму с нечеткими размытыми границами; эхогенность его была различная и менялась со временем (рис. 3, а). Структура рубца неоднородная за счет чередований участков гипо- и гиперэхогенности с мелкими анэхогенными включениями. За отдельными частями рубца определяли различной выраженности эффект дорсальной акустической тени. Сосуды в зоне рубца не визуализировали.

Со временем рубец становится более «зрелым» — плотным, с более четкими контурами, а эхогенность может повышаться (рис. 3, б). Размеры «зрелой» рубцовой ткани также варьируют, но в большинстве случаев после малотравматичной ВАБ-резекции рубцовая ткань или вовсе не определяется (в зоне операции отмечается локальное уменьшение объема железистой ткани в виде УЗ-паттерна «ниши», выполненной жировой тканью, рис. 3, в) или представлена небольшой полоской пониженной эхогенности, повторяющей канал хода роботизированной иглы, часто имеющий вертикальную ориентацию относительно кожи (рис. 3, г, УЗ-паттерн «вертикальной полосы»).

Дифференциация рубцовой ткани МЖ от опухолевой может быть сложной задачей, так как оба состояния имеют ряд сходных УЗ-признаков. В некоторых случаях рубец после ВАБ, представленный гипозоногенным звездчатой формы образованием, имитировал наличие злокачественного новообразования (УЗ-паттерн «злокачественного новообразования»). На рис. 4 представлены варианты ультразвуковой картины гипозоногенных рубцов после ВАБ-резекции, имеющие вид новообразований МЖ неправильной формы, с нечеткими неровными контурами, неоднородной структуры. Подобная УЗ-картина, характерная для послеоперационных изменений в первые

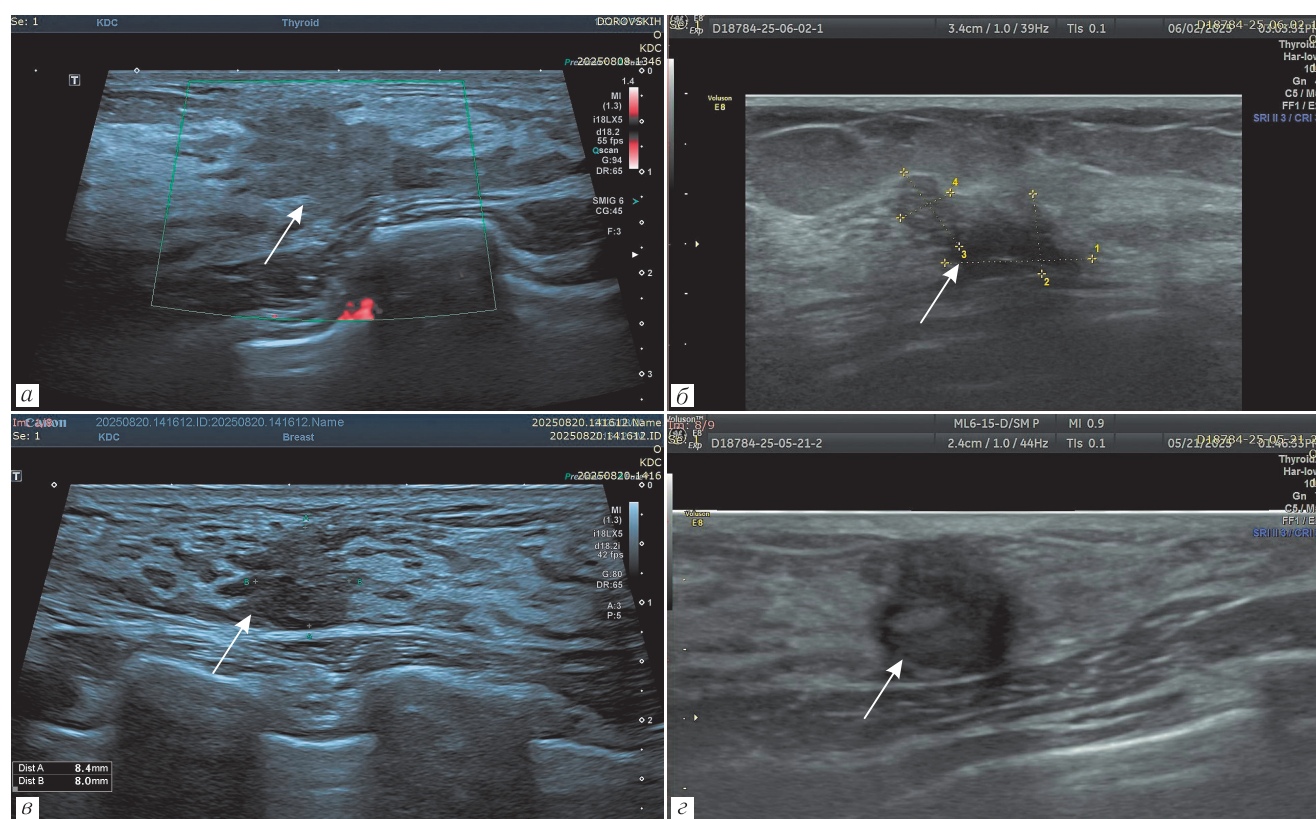


Рис. 4. Ультразвуковая картина рубца после ВАБ-резекции, имитирующего наличие новообразования (пояснения в тексте): а — В-режим+SMI, демонстрирующий отсутствие васкуляризации (в том числе микрокровотока) в рубце; б–г — В-режим. Стрелки, желтые метки — рубцовая ткань, имитирующая солидное новообразование

Fig. 4. Ultrasound image of a scar after VAB resection that mimics the presence of a neoplasm (explained in the text): а — B-mode+SMI, demonstrating the absence of vascularization (including micro-blood flow) in the scar; б–г — B-mode. Arrows, yellow labels — scar tissue that mimics a solid neoplasm

месяцы после вмешательства, по набору УЗ-признаков не позволяет исключить злокачественный процесс. Проведению дифференциальной диагностики помогают анамнестические данные о выполнении ВАБ-резекции, ее сроках, результатах гистологического исследования, а также наличие четкой взаимосвязи локализации рубца в ткани МЖ и визуальной проекции точки ввода роботизированной иглы на коже.

Помочь отличить картину рубцовой деформации на фоне послеоперационных изменений от остаточной ткани могут определенные УЗ-характеристики, важнейшей из которых является отсутствие васкуляризации в рубце (рис. 4, а, режим оценки микровас-

куляризации демонстрирует отсутствие локусов кровотока), тогда как истинный солидный компонент обычно васкуляризован. Васкуляризацию более четко можно выявить с помощью режима картирования микрокровотока (SMI), регистрирующего низкоскоростные потоки крови в опухоли. Так, на рис. 5, а, д в режиме ЦДК васкуляризация в солидном образовании не определяется, но выявлена при использовании более чувствительного режима SMI (рис. 5, з, е). В В-режиме истинный солидный компонент имеет более четкие контуры и хорошо дифференцируется от окружающих структур, что соответствует паттерну «плюс-ткань» (рис. 5, б, в).

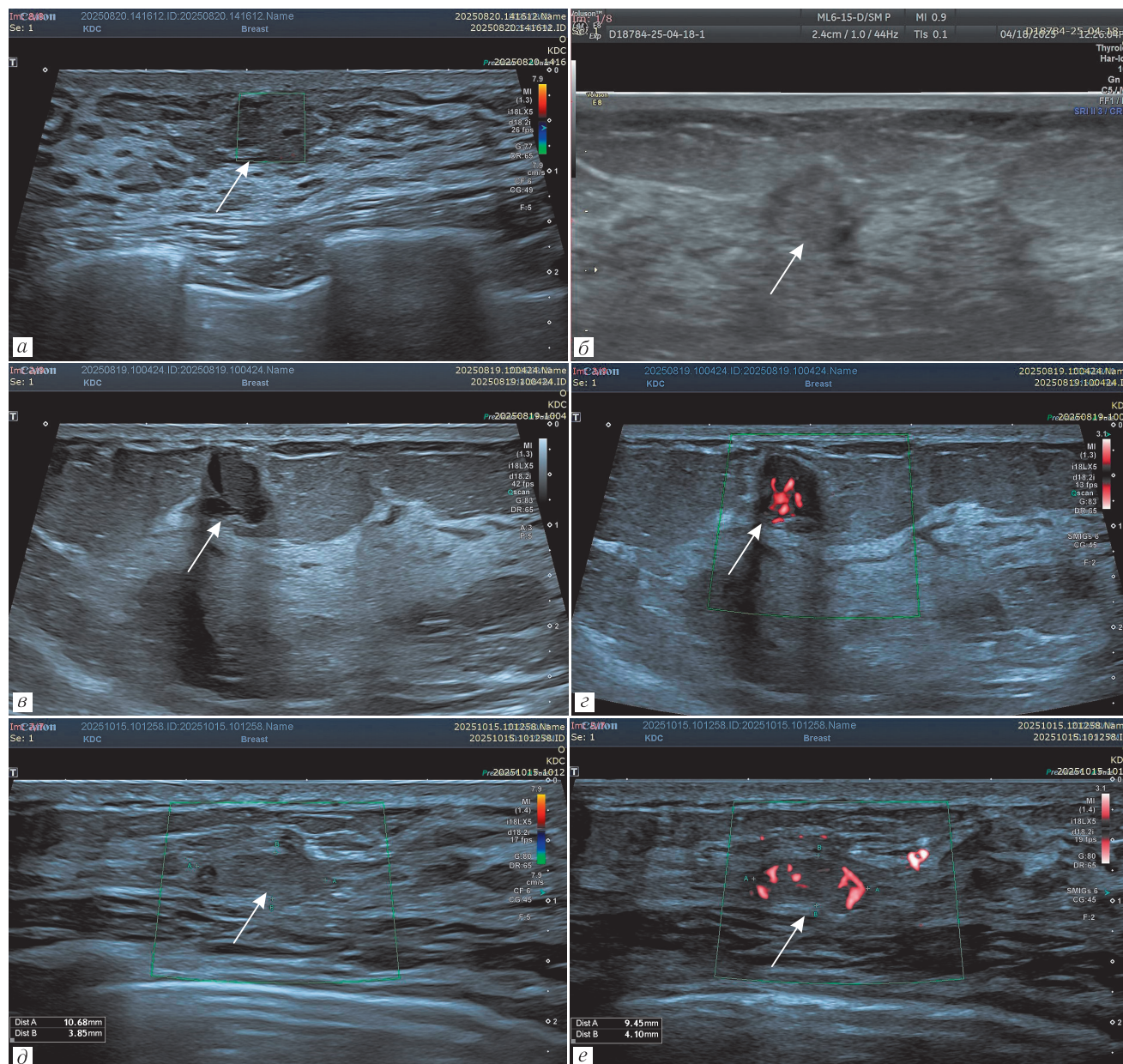


Рис. 5. Ультразвуковая картина остаточной ткани после ВАБ-резекции (пояснения в тексте): а, д — остаточная ткань новообразования, режим ЦДК, нет картирования кровотока; б, в — остаточная ткань новообразования, В-режим; г, е — остаточная ткань новообразования, режим детекции микроваскуляризации (SMI), есть картирование кровотока. Стрелки — остаточная ткань новообразования

Fig. 5. Ultrasound image of residual tissue after VAB resection (explained in the text): а, д — residual tumor tissue, color flow mapping mode, no blood flow mapping; б, в — residual tumor tissue, B-mode; г, е — residual tumor tissue, microvascularization detection mode (SMI), blood flow mapping. Arrows — residual tumor tissue

Важную роль играет УЗИ в динамике: размеры солидного образования, в отличие от рубца, могут увеличиваться со временем. УЗ-признаком, указывающим на рецидив в ложе удаленного новообразования, служит появление солидного компонента, ранее не определяемого в послеоперационном периоде, в сочетании с четкой взаимосвязью (лока-

лизацией) образования в проекции точки входа роботизированной иглы визуально на коже или определяемых рубцовых изменений в зоне операции (рис. 6, а).

В ряде случаев в области выполненной резекции новообразования МЖ можно видеть иные изменения, не связанные с ростом солидного образования,

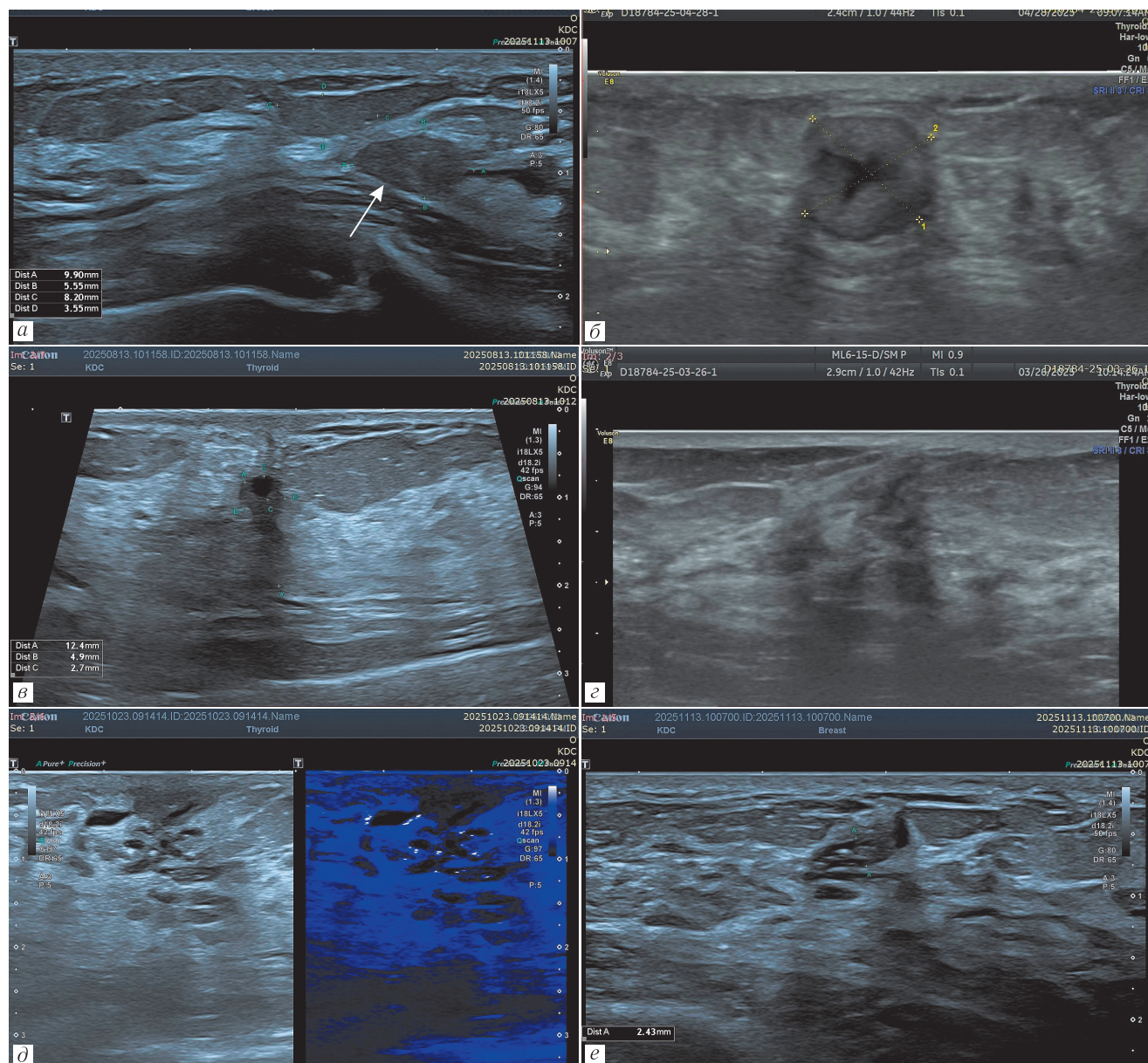


Рис. 6. Иные изменения ткани молочной железы после ВАБ-резекции (пояснения в тексте): а — рецидив новообразования в зоне выполненной ранее ВАБ-резекции. Указаны размеры образования и УЗ-паттерна «ниши» после ранее удаленной опухоли. Стрелка — ткань новообразования; б — асептический некроз жировой дольки (желтые метки); в — УЗ-паттерн рубца в виде «вертикальной полосы» с включением анэхогенной микрокисты. Указаны размеры рубца и кисты; г — диффузные фиброзные изменения в зоне операции без формирования рубца и/или «ниши»; д — очаг мастопатии с микрокальцинатами в месте выполнения ВАБ-резекции (В-режим+micro-pure); е — локальный фрагмент дуктоэктазии с неоднородным содержимым в зоне операции (метки)

Fig. 6. Other changes in the breast tissue after VAB resection (explained in the text): а — recurrence of a neoplasm in the area of a previously performed VAB resection. The size of the neoplasm and the ultrasound pattern of the «niche» after the previously removed tumor are indicated. The arrow indicates the tissue of the neoplasm; б — aseptic necrosis of a fat lobe (yellow marks); в — an ultrasound pattern of a scar in the form of a «vertical stripe» with an anechoic microcyst. The size of the scar and the cyst are indicated; г — diffuse fibrotic changes in the surgical area without scar formation and/or «niche»; д — Focal mastopathy with microcalcifications at the site of VAB resection (B-mode+micropure); е — local fragment of ductoectasia with heterogeneous content in the surgical area (marks)

но обусловленные выполненным вмешательством. На рис. 6, б представлена УЗ-картина асептического некроза жировой долики (подтверждено при морфологической верификации, выполненной в связи с невозможностью исключить новообразование). На рис. 6, в представлен УЗ-паттерн рубца в виде «вертикальной полосы», но с включением анэхогенной микрокисты. На рис. 6, г в зоне выполненного вмешательства определяются диффузные фиброзные изменения без формирования обособленной структуры рубца или «ниши». На рис. 6, д представлен очаг мастопатии, сформировавшийся в зоне выполненной резекции крупной фибroadеномы, представленный сгруппированными мелкими фрагментами дуктоэктазии, перемежающимися гиперэхогенными включениями фиброзной ткани с включением микрокальцинатов, хорошо определяемыми в режиме *microprige*. На рис. 6, е, напротив, в зоне ВАБ-резекции лоцируется единичный фрагмент расширенного протока с неоднородным содержимым в нем. Следует отметить, что описанные выше изменения носили единичный характер, их встречаемость составляла 1–2 случая на всех пациенток, приходивших на контрольное УЗИ.

Таким образом, оценка ультразвуковой картины МЖ в ложе удаленного новообразования у пациенток с подозрением на остаточную ткань, является сложной диагностической задачей, требующей знания технологических особенностей выполненного вмешательства, использования клинического мышления, учета анамнестических данных, применения дополнительных УЗ-режимов и должна проводиться как минимум дважды в динамике, особенно если первое УЗИ выполнялось в сроки до 6 месяцев после операции. В случае сомнений в наличии опухолевой ткани необходимо выполнить дополнительные методы исследования, в том числе трепан-биопсию. В сложных диагностических случаях у 4 пациенток потребовалось проведение морфологического исследования для верификации заподозренной остаточной ткани, которая была подтверждена у 2 (50%).

Обсуждение. Консенсусное заявление группы по изучению малоинвазивных методик хирургии МЖ гласит, что ВАБ не только является безопасным методом забора ткани для гистологического исследования, но и подходит для терапевтической резекции симптоматических доброкачественных образований [19].

Несмотря на растущую востребованность и распространенность методики ВАБ-резекции доброкачественных новообразований МЖ, в литературе мало данных об ультразвуковой картине в разные сроки после вмешательства [15]. В ранние сроки после операции основной задачей УЗИ является контроль геморрагических осложнений, частота развития которых зависит от размера и количества удаляемых новообразований, а также от выбранного способа гемостаза. Так, Е. S. Ко и соавт. в первую

неделю от вмешательства наблюдали при УЗИ гематомы в 84% случаев, а через 1 месяц гематомы рассосались во всех поражениях, кроме пяти. При этом в ложе удаленных новообразований стали отмечаться иные структурные изменения у 90% наблюдаемых, в том числе часть из них (11 пациентов из 32) имитировали злокачественные. Через 6 месяцев при УЗИ было выявлено уже только 23 (71%) ложа с различной степенью структурных изменений, при этом 6 (19%) содержали остаточную ткань фибroadеномы. В сроки более 6 месяцев после ВАБ-резекции структурные изменения, определяемые при УЗИ, носили менее выраженный характер, чем при исследовании в первый месяц. Статистически значимой связи между ультразвуковой картиной и исходными данными характеристик удаляемых новообразований и калибра роботизированной иглы авторами при этом выявлено не было, за исключением связи между размерами гематомы и размером опухоли [15]. Проанализировав собственный опыт наблюдения пациенток после ВАБ-резекции, мы получили схожие данные в части уменьшения процента подозрений на остаточную ткань после выполнения динамических УЗИ в более поздние сроки. При этом процент геморрагических осложнений в ранний послеоперационный период был ниже, что, по-видимому, объясняется использованием эффективного способа гемостаза, контролируемого при УЗИ в режиме реального времени при осуществлении процедуры [12].

Наиболее сложными в плане дифференциальной диагностики при УЗИ являются структурные изменения в ложе опухоли, представляющие собой гипозоногенное образование неправильной звездчатой формы с нечеткими неровными контурами, имитирующее злокачественное новообразование. Большую диагностическую ценность при этом имеют УЗ-режимы оценки васкуляризации (особенно микроваскуляризации).

По данным Л. В. Гуюджян и соавт., наблюдавших пациенток в послеоперационном периоде после мастэктомии и столкнувшихся с похожей проблемой дифференцировки рубцовых изменений и рецидива заболевания, для локального фиброза оказались характерными следующие УЗ-критерии: пониженная интенсивность и «тяжистая» структура, а также отсутствие васкуляризации. Авторы подчеркивают, что именно наличие кровотока позволило им дифференцировать рецидивы рака молочной железы от рубцовых послеоперационных изменений [17]. Такая ультразвуковая картина при сопоставлении ее с анамнезом (выполнена ВАБ-резекция, образование верифицировано как доброкачественное) и нахождении в проекции точки входа роботизированной иглы, требует динамического наблюдения. О. В. Бусыгина и соавт. отмечают, что в 10,3% случаев (27 пациенток) регистрировался гипозоногенный рубец в зоне удаления новообразования МЖ,

и в этой ситуации чувствительность традиционного УЗИ в выявлении злокачественных новообразований в зоне рубца составляла 50%. Для дифференциальной диагностики авторы предлагают сложную методику динамических УЗИ 1 раз в 6 месяцев, заключающуюся в разметке и наблюдении за массивом подозрительной рубцовой ткани [19].

S. Huber и соавт., напротив, приводят данные о том, что ВАБ иглой 11 калибра редко приводит к изменениям, которые могут повлиять на ультразвуковую картину МЖ при последующем наблюдении через 6 месяцев (в 74 динамических наблюдениях из 91 выполненных ВАБ-резекций новообразований) [20], что, по-видимому, обусловлено небольшим объемом анализируемой выборки и небольшими размерами подлежащих удалению новообразований с использованием иглы небольшого калибра.

Следующей задачей и одновременно проблемой УЗИ в отдаленном послеоперационном периоде является диагностика остаточной ткани или рецидива новообразования МЖ, что представляет сложность с учетом возможных фиброзных структурных изменений в ложе. По данным Z. L. Wang и соавт. при анализе результатов удаления 79 новообразований все процедуры были технически успешными, но при УЗИ в последующие периоды после резекции оказалось, что только 93,7% (74 из 79) опухолей были полностью удалены [21]. С. К. Yom приводит данные о том, что в течение 2 лет после ВАБ-резекции остаточные поражения были обнаружены у 10% (из 184) пациенток при контрольных УЗИ, но через 2 года или более остаточные массы были обнаружены уже только у 6,5% пациенток. Рубцовые изменения также уменьшились с 36,0% до 15,8% за указанный период наблюдения [22]. По данным Е. У. Ко частота полного удаления новообразования по результатам УЗИ сразу после процедуры ВАБ-резекции составила 95,8%, а частота полного удаления при контрольном УЗИ через 6 месяцев снизилась до 92,3%, что говорит о затрудненной дифференцировке остаточной ткани в ложе в ранние сроки от операции, обусловленной отеком ткани или наличием гематомы [23]. Такие разноречивые данные обусловлены особенностями УЗ-визуализации ложа в условиях отека и текущих репаративных процес-

сов, а также формирования рубцовых изменений, что может приводить как к гипо-, так и к гипердиагностике остаточной ткани в ранние сроки после вмешательства.

Закключение. Основной задачей УЗИ в ранние сроки после ВАБ-резекции является контроль геморрагических осложнений, тогда как в поздние сроки оценке подлежат формирование рубцовой ткани, исключение остаточной ткани и/или рецидива новообразований. Удаление доброкачественных новообразований МЖ путем ВАБ-резекции может приводить к структурным изменениям в области ложа, отличающихся значительной вариабельностью.

Наиболее яркими единицами эхоэмиотики при этом являются паттерны «злокачественного новообразования», «ниши», «вертикальной полосы», «плюс-ткань». Знание эхоэмиотики этих изменений важно как во избежание ненужных биопсий в случаях, когда ультразвуковая картина имитирует злокачественные новообразования, так и для дифференцировки остаточной ткани.

Ключевым моментом в оценке УЗ-картины, подозрительной на остаточную ткань новообразования, является динамическое наблюдение, особенно если первое УЗИ выполнено в сроки менее 6 месяцев. Так, выполнение повторного исследования у пациенток с подозрением на остаточную ткань при первичном УЗИ в сроки до 6 месяцев позволило исключить ее у каждой третьей женщины. Таким образом, хотя бы одно динамическое УЗИ у пациенток после выполнения ВАБ-резекции доброкачественного новообразования МЖ в отдаленном послеоперационном периоде должно быть выполнено в сроки более 6 месяцев после вмешательства.

Спорная УЗ-картина требует применения дополнительных УЗ-режимов, динамического контроля зоны интереса, перекрестных методов исследования, а в ряде случаев и морфологической оценки процесса.

С учетом растущего количества пациенток, которым выполняются малоинвазивные резекции доброкачественных новообразований МЖ, целесообразно проведение проспективных многоцентровых исследований с единым алгоритмом динамического наблюдения женщин в раннем и отдаленном послеоперационном периоде.

Сведения об авторах:

Марущак Елена Александровна — кандидат медицинских наук, заведующая отделением ультразвуковой диагностики федерального государственного бюджетного научного учреждения «Российский научный центр хирургии имени академика Б. В. Петровского»; 119435, Москва, Абрикосовский пер., д. 2; доцент кафедры ультразвуковой диагностики факультета дополнительного профессионального образования Института непрерывного образования и профессионального развития федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н. И. Пирогова» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 117513, Москва, ул. Островитянова, д. 1; e-mail: e.marushchak@mail.ru; ORCID 0000-0001-5639-3315;

Зубарева Елена Анатольевна — доктор медицинских наук, профессор, заведующая кафедрой ультразвуковой диагностики факультета дополнительного профессионального образования Института непрерывного образования и профессионального развития федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н. И. Пирогова» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 117513, Москва, ул. Островитянова, д. 1; e-mail: zubareva-elena@mail.ru; ORCID 0000-0002-9997-4715;

Фисенко Елена Полиектовна — доктор медицинских наук, главный научный сотрудник лаборатории ультразвуковой диагностики отдела клинической физиологии, инструментальной и лучевой диагностики федерального государственного бюджетного научного учреждения «Российский научный центр хирургии имени академика Б. В. Петровского»; 119435, Москва, Абрикосовский пер., д. 2; e-mail: e.fissenko@mail.ru; ORCID 0000–0003–4503–950X.

Information about the authors:

Elena A. Marushchak — Cand. of Sci. (Med.), Head of the ultrasound diagnostics department Scientific and Clinical Center No. 2 B. V. Petrovsky Russian Research Surgery Center; Associate professor of the ultrasound diagnostics department, N. I. Pirogov Russian National Research Medical University, Moscow; e-mail: e.marushchak@mail.ru; ORCID 0000–0001–5639–3315;

Elena A. Zubareva — Dr. of Sci. (Med.), Professor, Chief of the ultrasound diagnostics department N. I. Pirogov Russian National Research Medical University, Moscow; e-mail: zubareva-elena@mail.ru; ORCID 0000–0002–9997–4715;

Elena P. Fisenko — Dr. of Sci. (Med.), Chief Researcher, Ultrasound Diagnostics Department, of the Department of Clinical Physiology, Instrumental and Radiation Diagnostics, B.V. Petrovsky Russian Research Center of Surgery, Moscow; e-mail: e.fissenko@mail.ru; ORCID 0000–0003–4503–950X.

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства согласно международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распределен следующим образом: концепция и план исследования — Е.А. Марущак, Е.А. Зубарева; сбор и анализ данных — Е.А. Марущак, Е.П. Фисенко, Е.А. Зубарева; подготовка рукописи — Е.А. Марущак, Е.П. Фисенко, Е.А. Зубарева.

Authors' contributions. All authors confirm their authorship according to the international ICMJE criteria (all authors made substantial contributions to the conception, research, and preparation of the article, and read and approved the final version before publication). Special contribution: EAM, EAZ aided in the concept and plan of the study; EAM, EPF, EAZ provided collection and analysis of data; EAM, EPF, EAZ preparation of the manuscript.

Потенциальный конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Disclosure: the authors declare that they have no competing interests.

Соответствие принципам этики: Исследование было одобрено локальным этическим комитетом РНЦХ им. акад. Б. В. Петровского (протокол № 5 от 23 мая 2025). Информированное согласие получено от каждого пациента.

Adherence to ethical standards: The study was approved by the Local Ethics Committee of the Russian National Research Center. Academician B. V. Petrovsky (Protocol No. 5 dated May 23, 2025). Informed consent was obtained from each patient.

Поступила/Received: 28.11.2025

Принята к печати/Accepted: 29.05.2026

Опубликована/Published: 29.06.2026

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Пушкарев А.В., Галеев М.Г., Пушкарев В.А. и др. Доброкачественные опухоли молочной железы и факторы риска их развития // *Уральский медицинский журнал*. 2022. Т. 21, № 5. С. 128–137. [Pushkarev A.V., Galeev M.G., Pushkarev V.A. et al. Benign breast tumors and risk factors for their development. *Ural Medical Journal*, 2022, Vol. 21, No. 5, pp. 128–137 (In Russ.)]. doi: 10.52420/2071-5943-2022-21-5-128-137.
2. Onstad M., Stuckey A. Benign breast disorders // *Obstet Gynecol. Clin. North Am.* 2013. Vol. 40, No. 3. P. 459–473. doi: 10.1016/j.ogc.2013.05.004.
3. Безнощенко Г.Б., Кравченко Е.Н., Кропмаер К.П. и др. Современные патогенетические аспекты доброкачественных дисплазий молочных желез // *Мать и дитя в Кзбассе*. 2018. № 1 (72). С. 93–96. [Beznoshchenko G.B., Kravchenko E.N., Kropmaer K.P. et al. Modern pathogenetic aspects of benign mammary gland dysplasias. *Mother and child in the Kuzbass*, 2018, No. 1 (72), pp. 93–96 (In Russ.)]. doi: 10.34673/MD.2018.1.93-96.
4. Надеев А.П., Козяев М.А., Садыкова А.М. и др. Возрастной состав женщин и структура заболеваний молочной железы по данным биопсийного исследования // *Journal of Siberian Medical Sciences*. 2018. № 2. С. 19–25. [Nadeev A.P., Kozyaev M.A., Sadykova A.M. et al. Age Composition of Women and Structure of Breast Diseases According to Biopsy Research. *Journal of Siberian Medical Sciences*, 2018. No. 2, pp. 19–25 (In Russ.)].
5. Родионов В.В., Сметник А.А., Сенча А.Н. и др. Алгоритм диагностики и лечения доброкачественной дисплазии молочной железы // *Акушерство и гинекология*. 2022. № 6. С. 23–34. [Rodionov V.V., Smetnik A.A., Sencha A.N. et al. Algorithm for the diagnosis and treatment of benign mammary dysplasia. *Obstetrics and gynecology*, 2022, No. 6, pp. 23–34 (In Russ.)].
6. Высоцкая И.В., Лetyagin В.П. Атипичная гиперплазия молочной железы // *Опухоли женской репродуктивной системы*. 2015. Т. 11, № 4. С. 10–17. [Vysotskaya I.V., Letyagin V.P. Atypical breast hyperplasia. *Tumors of the female reproductive system*, 2015, Vol. 11, No. 4, pp. 10–17 (In Russ.)]. doi: 10.17650/1994-4098-2015-11-4-10-17.
7. Bennett I. C., Saboo A. The Evolving Role of Vacuum Assisted Biopsy of the Breast: A Progression from Fine-Needle Aspiration Biopsy // *World J. Surg.* 2019, Vol. 43, No. 4. P. 1054–1061. doi: 10.1007/s00268-018-04892-x.
8. Lakoma A., Kim E.S. Minimally invasive surgical management of benign breast lesions // *Gland Surg.* 2014. Vol. 3, No. 2. P. 142–148. doi: 10.3978/j.issn.2227-684X.2014.04.01.
9. Palak P., Karbhari A., Shetty N. et al. Safety and Efficacy of Vacuum-Assisted Breast Biopsies under Ultrasound and Stereotactic Guidance // *Journal of Clinical Interventional Radiology*. 2023. Vol. 7, No. 3. P. 172–178. doi: 10.1055/s-0043-1768040.
10. Lui C.Y., Lam H.S. Review of Ultrasound-guided Vacuum-assisted Breast Biopsy: Techniques and Applications // *J. Med. Ultrasound*. 2010. Vol. 18. P. 1–10. doi: 10.1016/S0929-6441(10)60001-X.
11. Wang W.J., Wang Q., Cai Q.P., Zhang J.Q. Ultrasonographically guided vacuum-assisted excision for multiple breast masses: non-randomized comparison with conventional open excision // *J. Surg. Oncol.* 2009. Vol. 100, No. 8. P. 675–680. doi: 10.1002/jso.21394.

12. Марущак Е.А., Бутенко А.В., Зубарева Е.А. и др. Оценка эффективности лазерной интерстициальной коагуляции при выполнении вакуумной аспирационной резекции новообразований молочных желез под ультразвуковым контролем // *Ультразвуковая и функциональная диагностика*. 2025. Т. 31, № 1. С. 85–100. [Marushchak E.A., Butenko A.V., Zubareva E.A. et al. Evaluation of the effectiveness of laser interstitial coagulation during vacuum aspiration resection of breast neoplasms under ultrasound control. *Ultrasound and Functional Diagnostics*, 2025, Vol. 31, No. 1, pp. 85–100 (In Russ.). doi: 10.24835/1607-0771-318.
13. Jiang Y., Lan H., Ye Q. et al. Mammotome® biopsy system for the resection of breast lesions: Clinical experience in two high-volume teaching hospitals // *Exp. Ther. Med.* 2013. Vol. 6, No. 3. P. 759–764. doi: 10.3892/etm.2013.1191.
14. Cochrane R.A., Valasiadou P., Wilson A.R., Al-Ghazal S.K., Macmillan R.D. Cosmesis and satisfaction after breast-conserving surgery correlates with the percentage of breast volume excised // *Br. J. Surg.* 2003. Vol. 90, No. 12. P. 1505–1509. doi: 10.1002/bjs.4344.
15. Ko E.S., Han H., Lee B.H., Choe D.H. Sonographic changes after removing all benign breast masses with sonographically guided vacuum-assisted biopsy // *Acta Radiol.* 2009. Vol. 50, No. 9. P. 968–974. doi: 10.3109/02841850903130836.
16. Thurley P., Evans A., Hamilton L., James J., Wilson R. Patient satisfaction and efficacy of vacuum-assisted excision biopsy of fibroadenomas // *Clin. Radiol.* 2009. Vol. 64, No. 4. P. 381–385. doi: 10.1016/j.crad.2008.09.013.
17. Гуюджян Л.В., Шолохов В.Н., Комов Д.В. Ультразвуковая томография в диагностике локальных рецидивов рака молочной железы // *Вестник РОНЦ им. Н.Н. Блохина РАМН*. 2008. Т. 19, № 4. С. 31–35. [Guujian L.V., Sholokhov V.N., Komov D.V. Ultrasound tomography in the diagnosis of local recurrence of breast cancer. *Bulletin of the N. N. Blokhin Russian Cancer Research Center*, 2008, Vol. 19, No. 4, pp. 31–35 (In Russ.).]
18. Hahn M., Krainick-Strobel U., Toellner T. et al. Interdisciplinary consensus recommendations for the use of vacuum-assisted breast biopsy under sonographic guidance: first update 2012 // *Ultraschall Med.* 2012. Vol. 33, No. 4. P. 366–371. doi: 10.1055/s-0032-1312831.
19. Бусыгина О.В., Бахтиозин Р.Ф., Пасынков Д.В. и др. Количественное динамическое ультразвуковое исследование в наблюдении гипоехогенных послеоперационных рубцов молочной железы // *REJR*. 2019. Т. 9, № 3. С. 93–105. [Busygina O.V., Bakhtiozin R.F., Pasyнков D.V. et al. Quantitative dynamic ultrasound examination in the monitoring of hypoechoic postoperative scars of the mammary gland. *REJR*, 2019, Vol. 9, No. 3, pp. 93–105 (In Russ.).] doi: 10.21569/2222–7415-2019-9-3-93-105.
20. Huber S., Wagner M., Medl M., Czembirek H. Benign breast lesions: minimally invasive vacuum-assisted biopsy with 11-gauge needles patient acceptance and effect on follow-up imaging findings // *Radiology*. 2003. Vol. 226, No. 3. P. 783–790. doi: 10.1148/radiol.2271011933.
21. Wang Z.L., Liu G., Li J.L. et al. Sonographically guided percutaneous excision of clinically benign breast masses // *J. Clin. Ultrasound*. 2011. Jan; Vol. 39, No. 1. P. 1–5. doi: 10.1002/jcu.20752.
22. Yom C.K., Moon B.I., Choe K.J., Choi H.Y., Park Y.L. Long-term results after excision of breast mass using a vacuum-assisted biopsy device // *ANZ J. Surg.* 2009. Vol. 79, No. 11. P. 794–798. doi: 10.1111/j.1445-2197.2009.05103.x.
23. Ko E.Y., Bae Y.A., Kim M.J. et al. Factors affecting the efficacy of ultrasound-guided vacuum-assisted percutaneous excision for removal of benign breast lesions // *J. Ultrasound Med.* 2008. Vol. 27, No. 1. P. 65–73. doi: 10.7863/jum.2008.27.1.65.

Открыта подписка на 2-е полугодие 2026 года.

Подписной индекс:

«Урал Пресс» (Пресса России) **014023**

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНОЙ ТОМОГРАФИИ С ДИНАМИЧЕСКИМ КОНТРАСТНЫМ УСИЛЕНИЕМ В ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКЕ МАММОГРАФИЧЕСКИ ВЫЯВЛЯЕМЫХ АСИММЕТРИЙ МОЛОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ: ПРОСПЕКТИВНОЕ КОГОРТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

^{1,2}С. Н. Меринов[✉], ^{1,2,3}Д. В. Пасынков^{✉*}, ³М. Г. Тухбатуллин[✉], ^{1,2}М. А. Михальцова[✉], ^{1,2}О. В. Бусыгина[✉],
^{1,2}Е. А. Романычева[✉], ²Е. А. Петров[✉]

¹Марийский государственный университет, Йошкар-Ола, Россия

²Республиканский клинический онкологический диспансер, Йошкар-Ола, Россия

³Казанская государственная медицинская академия, Казань, Россия

ВВЕДЕНИЕ: Рак молочной железы (РМЖ) представляет собой одну из наиболее сложных и актуальных проблем в современной клинической онкологии, требуя для оптимизации выживаемости комплексного подхода, в котором ключевое значение имеет раннее выявление заболевания. В настоящее время маммография остается базовым методом скрининга, обладая сравнительно высокой чувствительностью, однако специфичность маммографии невелика. Особые сложности возникают при интерпретации изменений категории BI-RADS 3, где вероятность злокачественности не превышает 2%. К таким изменениям относятся асимметрии, выявляемые в 1–2% всех маммографических исследований. В то же время привлекает возможность использования магнитно-резонансной томографии (МРТ), характеризующейся отсутствием лучевой нагрузки, а также возможностью дифференцирования тканей как по характеристикам МР-сигнала, так и по кинетике накопления и вымывания контрастного вещества.

ЦЕЛЬ: Оценка диагностической ценности магнитно-резонансной томографии (МРТ) молочной железы (МЖ) с динамическим контрастированием (ДК) в дифференциальной диагностике маммографически выявляемых асимметрий МЖ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ: Включено 57 пациенток в возрасте $43,13 \pm 6,57$ года, у которых при выполнении маммографии были выявлены асимметрии. Всем пациенткам выполняли сбор анамнеза и клиническое обследование МЖ, а также анализ и оценку результатов других исследований МЖ. МРТ МЖ с динамическим контрастированием выполняли на системе Siemens Amira (Германия) с напряженностью магнитного поля 1,5 Т с контрастным усилением гадобутролом в дозе 7,5 мл (1 ммоль) со скоростью 3–5 мл/с. Верификацию изменений осуществляли по результатам цито- и/или гистологического исследований либо наблюдения в течение минимум 3 лет.

Статистика: сравнение нормально распределенных выборок производили с использованием t-критерия Стьюдента, ненормально распределенных — с использованием критериев Уилкоксона и хи-квадрат. Статистическую достоверность констатировали при получении значений $p < 0,05$. Рассчитывали также значения чувствительности и специфичности для перекрестных таблиц 2×2 .

РЕЗУЛЬТАТЫ: Истинные асимметрии без объемного образования включали физиологические асимметрии, обусловленные неравномерным распределением железистой или фиброзной ткани, и асимметричный отек МЖ. Первый вариант встречался наиболее часто (50,86% наблюдений), при этом отмечалось наличие асимметрично расположенных скоплений железисто-фиброзной ткани в зонах, суммация которых соответствовала наблюдаемым при маммографии изменениям. Асимметричный отек МЖ может быть обусловлен как отечно-инфильтративным РМЖ, так и различными вариантами доброкачественного отека, встречался достаточно редко (3,51% всех случаев). О злокачественной природе отека свидетельствовали признаки метастатического поражения регионарных лимфоузлов либо наличие участков паренхимы, демонстрировавших подозрительную динамику контрастирования. Истинные асимметрии, обусловленные наличием объемного образования, могли быть обусловлены РМЖ (12,28% наблюдений) либо доброкачественными образованиями (22,81% наблюдений).

У 49,12% пациенток отмечалось накопление контраста в зоне асимметрии. ACR I тип кинетической кривой имел место в 50,0% случаев и во всех случаях соответствовал доброкачественным изменениям и поэтому характеризовался 100% прогностической ценностью положительного результата в отношении доброкачественной природы асимметрии. ACR II тип кинетической кривой был зафиксирован в 25,0% случаев; чувствительность и специфичность данного типа кинетической кривой в отношении асимметрий, обусловленных РМЖ, составили 60,0% и 82,61% соответственно. ACR III тип имел место у 25,0% пациенток. Чувствительность и специфичность данного типа кинетической кривой в отношении РМЖ составили 40,0% ($p < 0,001$) и 78,26% ($p = 0,053$).

ОБСУЖДЕНИЕ: Технические асимметрии, обусловленные различиями экспозиции, компрессии или укладки контралатеральных МЖ при получении маммографических изображений, по нашему мнению, достаточно легко идентифицируются при рутинной скрининговой маммографии и не подлежат дальнейшему анализу, требуя получения технически корректных

изображений. Ятрогенные асимметрии (послеоперационные рубцы) встречаются достаточно часто (14,04% в нашей выборке), однако также хорошо идентифицируются при клиническом обследовании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ: Общая чувствительность МРТ с ДК в диагностике инвазивного РМЖ на фоне маммографически выявляемых асимметрий составила 100%, специфичность — 69,57%.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: магнитно-резонансная томография, маммография, асимметрия, дифференциальная диагностика

* Для корреспонденции: Пасынков Дмитрий Валерьевич, e-mail: passynkov@mail.ru

Для цитирования: Меринов С.Н., Пасынков Д.В., Тухбатуллин М.Г., Михальцова М.А., Бусыгина О.В., Романычева Е.А., Петров Е.А. Использование магнитно-резонансной томографии с динамическим контрастным усилением в дифференциальной диагностике маммографически выявляемых асимметрий молочной железы: проспективное когортное исследование // *Лучевая диагностика и терапия*. 2026. Т. 17, № 2. С. 74–85, doi: <http://doi.org/10.22328/2079-5343-2026-17-2-74-85>.

MAGNETIC RESONANCE IMAGING WITH DYNAMIC CONTRAST ENHANCEMENT IN THE DISCRIMINATION OF MAMMOGRAPHICALLY REVEALED ASYMMETRIC DENSITY: A PROSPECTIVE COHORT STUDY

^{1,2}Serguei N. Merinov[✉], ^{1,2,3}Dmitry V. Pasynkov^{✉*}, ³Munir G. Tukhbatullin[✉], ^{1,2}Marina A. Mikhaltsova[✉],
^{1,2}Olga V. Busygina[✉], ^{1,2}Ekaterina A. Romanycheva[✉], ²Evgeny A. Petrov[✉]

¹Mari State University, Yoshkar-Ola, Russia

²Clinical Oncology Dispensary of Mari El Republic, Yoshkar-Ola, Russia

³Kazan State Medical Academy, Kazan, Russia

INTRODUCTION: Breast cancer (BC) is one of the most complex and significant problems in modern clinical oncology. This malignancy demands a multidisciplinary approach to improve survival, in which early detection plays a key role. Currently, mammography remains the only screening modality with relatively high sensitivity, but its specificity is only moderate. It is particularly difficult to differentiate BI-RADS 3 findings, for which the probability of malignancy does not exceed 2%. Asymmetric density represents one such finding, observed in 1–2% of all mammograms. In this context, magnetic resonance imaging (MRI) — which does not use ionizing radiation and allows tissue characterization based on both intrinsic MR signal and contrast uptake and wash-out kinetics — is of particular interest.

OBJECTIVE: To evaluate the diagnostic performance of dynamic contrast-enhanced breast MRI in differentiating mammographically detected asymmetric densities.

MATERIALS AND METHODS: We included 57 women (mean age 43.13 ± 6.57 years) who had an asymmetric density on mammography. For all women, we obtained the clinical history and performed a physical breast examination. We also reviewed the findings of other breast imaging modalities. Breast MRI was performed using a Siemens Amira 1.5 T scanner (Siemens, Germany). For contrast enhancement, we administered gadobutrol (7.5 mL, 1 mmol; infusion rate 3–5 mL/s). Lesion verification was achieved by histopathological examination or a minimum 3-year follow-up.

Statistics: normally distributed continuous variables were compared using the Student t-test; non-normally distributed variables were analyzed with the Wilcoxon signed-rank test or the χ^2 test, as appropriate. Statistical significance was set at $p < 0.05$. Sensitivity, specificity, and positive predictive value were calculated from 2×2 contingency tables.

RESULTS: True asymmetric densities without a focal lesion comprised physiological asymmetries caused by uneven distribution of glandular or fibrous tissue, as well as asymmetric breast edema. The former was observed in the majority of cases (50.86%). These cases demonstrated typical asymmetric islands of glandular and fibrous tissue, the summation of which could produce the mammographic finding. Asymmetric breast edema could be caused by inflammatory breast cancer or various benign conditions and was found relatively infrequently (3.51% of all cases). Malignant edema was characterized by signs of regional lymph node metastasis or by parenchymal areas with suspicious enhancement kinetics. True asymmetric densities caused by focal lesions were attributable to breast cancer (12.28%) or benign masses (22.81%).

Contrast enhancement in the area of asymmetry was observed in 49.12% of patients. Type I (persistent) enhancement was seen in 50.0% of cases without malignancy, yielding a positive predictive value for benign asymmetry of 100%. Type II (plateau) enhancement was found in 25.0% of cases; its sensitivity and specificity for breast cancer were 60.0% and 82.61%, respectively. Type III (washout) enhancement was observed in 25.0% of patients, with sensitivity and specificity for breast cancer of 40.0% ($p < 0.001$) and 78.26% ($p = 0.053$), respectively.

DISCUSSION: Technical asymmetric densities resulting from differences in exposure, compression, or breast positioning during mammography are usually easy to recognize and require technically adequate images for interpretation. Iatrogenic asymmetries (postsurgical scars) were common (14.04% of our series) but are readily identified on clinical examination.

CONCLUSION: The sensitivity of dynamic contrast-enhanced MRI for detecting invasive breast cancer in areas of mammographic asymmetry was 100%, but its specificity was only moderate (69.57%).

KEYWORDS: magnetic resonance imaging, mammography, asymmetric density, discrimination

* **For correspondence:** Dmitry V. Pasyunkov, e-mail: passynkov@mail.ru

For citation: Merinov S.N., Pasyunkov D.V., Tukhbatullin M.G., Mikhaltsova M.A., Busygina O.V., Romanycheva E.A., Petrov E.A. Magnetic resonance imaging with dynamic contrast enhancement in the discrimination of mammographically revealed asymmetric density: a prospective cohort study // *Diagnostic radiology and radiotherapy*. 2026. Vol. 17, No. 2 P. 74–85, <http://doi.org/10.22328/2079-5343-2026-17-2-74-85>.

Введение. Рак молочной железы (РМЖ) представляет собой одну из наиболее сложных и актуальных проблем в современной клинической онкологии. В 2020 г. данная патология впервые превзошла рак легкого, заняв лидирующие позиции в структуре глобальной онкологической заболеваемости, когда во всем мире было зафиксировано более 671 000 летальных исходов в общей сложности, примерно около 2,3 млн впервые диагностированных случаев среди женского населения [1, 2]. На территории Российской Федерации за период с 2011 по 2023 г. отмечается устойчивая тенденция к увеличению распространенности данной патологии. Показатель заболеваемости возрос с 366,8 до 541,7 случая на 100 000 населения. Позитивным является увеличение доли пациенток с I–II стадиями заболевания с 65,0% до 75,2%, что коррелирует со снижением годичной летальности с 8,7% до 4,8% и является во многом результатом внедрения в практику популяционных скрининговых программ. В 2023 г. в Российской Федерации было зарегистрировано 74 008 новых случаев данного заболевания [3].

Для оптимизации показателей выживаемости пациенток разработан комплексный подход, в котором ключевое значение имеет раннее выявление заболевания. В настоящее время маммография остается базовым методом скрининга, поскольку доказано, что систематическое проведение данного исследования способствует снижению смертности от РМЖ на 15–25% [4, 5]. Результаты крупных рандомизированных клинических исследований и мета-анализов подтверждают эффективность маммографического скрининга в снижении смертности от РМЖ: относительное снижение риска составляет 12–16% для женщин в возрасте 39–49 лет и достигает 33% для женщин старше 50 лет [6, 7].

Однако диагностическая эффективность маммографии демонстрирует значительную вариабельность в зависимости от структурных особенностей ткани молочной железы (МЖ). При жировой паренхиме (категории А–В по классификации Американской коллегии специалистов в области лучевой диагностики [ACR]) чувствительность метода приближается к 100%, однако при плотной паренхиме (категории ACR C–D) информативность его существенно снижается. Кроме того, специфичность маммографии составляет 80–90%, при этом достоверная дифференциальная диагностика возможна лишь при типичных проявлениях доброкачественных (инволютивная обызвествленная фиброаденома, жиросодержащие

образования) и злокачественных (новообразования с нечеткими, неровными контурами или спикюлированными образованиями высокой плотности неправильной формы) процессов [8]. В остальных клинических ситуациях маммография позволяет лишь предположить диагноз, требуя применения дополнительных диагностических методов [9].

Особые сложности возникают при интерпретации изменений категории 3 согласно Системе анализа и протоколирования результатов лучевых исследований МЖ (Breast Imaging Reporting and Data System [BI-RADS]), где вероятность злокачественности не превышает 2%. Это создает дилемму в выборе тактики ведения пациенток: агрессивный подход приводит к высокой частоте негативных результатов биопсии, в то время как выжидательная тактика сопряжена с риском прогрессирования агрессивных форм заболевания. К таким изменениям относятся асимметрии, выявляемые в 1–2% всех маммографических исследований [10]. Они представляют собой различные варианты изменения плотности ткани МЖ, обусловленные как патологическими (преимущественно очаговыми), так и физиологическими (часто локальными диффузными) процессами [11]. Дифференциальная диагностика подобных изменений требует применения всего спектра доступных диагностических методов, включая биопсию, что значительно усложняет диагностику и часто приводит к получению негативных результатов дорогостоящего многокомпонентного обследования [12].

Магнитно-резонансная томография (МРТ) МЖ представляет собой третий (после ультразвукового исследования) по важности метод диагностики в маммологии, демонстрирующий при исследовании плотной ткани МЖ чувствительность 71–100% (по сравнению с 75–91% при маммографии и 68–85% при УЗИ) [13]. Скрининговая МРТ показана женщинам с высоким риском развития РМЖ, включая носительниц мутаций *BRCA1/BRCA2*, наследственных синдромов, а также перенесших лучевую терапию на область грудной клетки в молодом возрасте [14]. Важными преимуществами метода являются отсутствие лучевой нагрузки, что позволяет проводить исследования с необходимой частотой, а также возможность дифференцирования тканей как по характеристикам МР-сигнала, так и по кинетике накопления и вымывания контрастного вещества, что недоступно другим методам лучевой диагностики, и отсутствие выраженной зависимости диагностической ценности от доли рентгеноплотных тканей

в паренхиме [15], что, как представляется, может способствовать повышению специфичности дифференциальной диагностики маммографически выявляемых асимметрий МЖ.

В результате **целью исследования** являлась оценка диагностической ценности магнитно-резонансной томографии МЖ с динамическим контрастированием (ДК) в дифференциальной диагностике маммографически выявляемых асимметрий МЖ.

Материалы и методы. Исследование одобрено Комитетом по этике Казанской государственной медицинской академии (протокол № 02/02 от 26 февраля 2026 г.). Информированное согласие получено от каждого пациента.

Пациенты. В данный анализ было включено 57 пациенток в возрасте $43,13 \pm 6,57$ года, у которых при выполнении маммографии были выявлены асимметрии. Всем пациенткам выполняли сбор анамнеза и клиническое обследование МЖ, а также анализ и оценку результатов других исследований МЖ (маммографии, УЗИ). Верификацию изменений осуществляли по результатам цито- и/или гистологического исследований либо наблюдения в течение минимум 3 лет.

Протокол МРТ. МРТ МЖ с динамическим контрастированием выполняли на системе Siemens Amira (Германия) с напряженностью магнитного поля 1,5 Т. Все исследования выполнялись с использованием специальной катушки для исследований МЖ. Пациенткам в пременопаузе исследование выполняли на 6–12-й дни менструального цикла.

Использовали следующий протокол МРТ.

1. Локалайзер (сагиттальные изображения).
2. T1-TSE взвешенные изображения: TR — 6,69 мс, TE — 2,36 мс, толщина среза — 3,0 мм, поле наблюдения (FOV) — 340 мм.
3. T1-TSE взвешенные изображения с жироподавлением: TR — 4,99 мс, TE — 2,36 мс, толщина среза — 4,0 мм, расстояние между срезами — 2 мм, FOV — 360 мм.
4. T2-TSE взвешенные изображения: TR — 4000 мс, TE — 65 мс, толщина среза — 3,0 мм, FOV — 340 мм.
5. Постконтрастные T1-FL3D-SPAIR с жироподавлением: TR — 4,84 мс, TE — 2,39 мс, толщина среза — 1,5 мм, FOV — 360 мм. Данные изображения (одно преконтрастное и не менее четырех постконтрастных с интервалом 80 с) получали после болюсного введения МР-контрастного препарата Гадовист (гадобутрол) в дозе 7,5 мл (1 ммоль) со скоростью 3–5 мл/с. В качестве постобработки получали также субтракционные (каждое постконтрастное — преконтрастное) изображения.
6. В качестве дополнительных могли получать диффузионно-взвешенные изображения.

Анализ кинетики накопления контрастного вещества. Согласно лексикону ACR BI-RADS для МРТ (2013), начальную фазу кинетической кривой опреде-

ляли как первые 2 минуты после болюсного введения контраста. Начальная фаза определялась как медленная (повышение интенсивности сигнала менее чем на 50% после истечения первых 2 минут относительно исходного уровня); умеренная (повышение интенсивности сигнала менее чем на 50–100% относительно исходного уровня) или быстрая (повышение интенсивности сигнала более чем на 100% относительно исходного уровня). Отсроченная фаза контрастирования определялась как период после истечения первых 2 минут после введения контраста и классифицировалась как персистирование (если отмечалось повышение интенсивности сигнала минимум на 10% относительно таковой в начальной фазе), плато (если интенсивность сигнала не изменялась относительно таковой в начальной фазе) или вымывание (если отмечалось снижение интенсивности сигнала минимум на 10% относительно таковой в начальной фазе).

Выделяли четыре типа накопления контраста:

- 1) отсутствие контрастирования;
- 2) медленное постепенное контрастирование во всех фазах (тип ACR I);
- 3) быстрое контрастирование в начальной фазе с последующим плато (тип ACR II);
- 4) быстрое контрастирование в начальной фазе с последующим вымыванием (тип ACR III) [16].

Статистическая обработка. Оценка нормальности распределения выборок осуществлялась с использованием критерия Колмогорова–Смирнова путем сравнения со стандартным нормальным распределением. 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 частот осуществляли с помощью критерия χ^2 для перекрестных таблиц 2×2 . Статистическую достоверность различия сравниваемых выборок констатировали при получении значений $p < 0,05$. Все статистические анализы выполняли в программном пакете SPSS 13.0. Рассчитывали также чувствительность, специфичность, прогностическую ценность положительного результата (PPV) и прогностическую ценность отрицательного результата (NPV) МРТ с ДК в выявлении РМЖ в зоне маммографически выявляемой асимметрии МЖ.

Результаты. *Технические асимметрии*, обусловленные различиями экспозиции, компрессии или укладки контралатеральных МЖ при получении маммографических изображений, по нашему мнению, достаточно легко идентифицируются при рутинной скрининговой маммографии и не подлежат дальнейшему анализу, требуя получения технически корректных изображений [11]. И поэтому подходы к их дифференциальной диагностике путем МРТ нами не рассматривались.

Истинные асимметрии без объемного образования

Физиологические асимметрии, обусловленные неравномерным распределением железистой (как правило) или фиброзной ткани ввиду индивидуальных особенностей структуры МЖ и/или неравномерной ее инволюции, составляют подавляющее большинство всех асимметрий МЖ (50,86%; 29 из 57 наблюдений). При МРТ данной группы асимметрий отмечалось наличие асимметрично расположенных скоплений железисто-фиброзной ткани в зонах, суммация которых соответствовала наблюдаемым при маммографии изменениям. Проблемой могло быть выявление островков железистой ткани без признаков злокачественного роста, демонстрировавших подозрительную кинетику накопления контрастного вещества (рис. 1).

Асимметричный отек МЖ может быть обусловлен как отечно-инфильтративным РМЖ, так и различными вариантами доброкачественного отека (например, при хронической сердечной недостаточности). Встречается достаточно редко (3,51 % всех случаев, 2 наблюдения). О злокачественной природе отека свидетельствовали, как правило, признаки метастатического поражения регионарных лимфоузлов либо наличие участков паренхимы, демонстрировавших подозрительную динамику контрастирования (рис. 2).

Истинные асимметрии, обусловленные наличием объемного образования

РМЖ (узловые и инфильтративные формы) являлся причиной маммографически выявляемых асимметрий в 12,28% (7 из 57) наблюдений. Поскольку в большинстве случаев наличие асиммет-

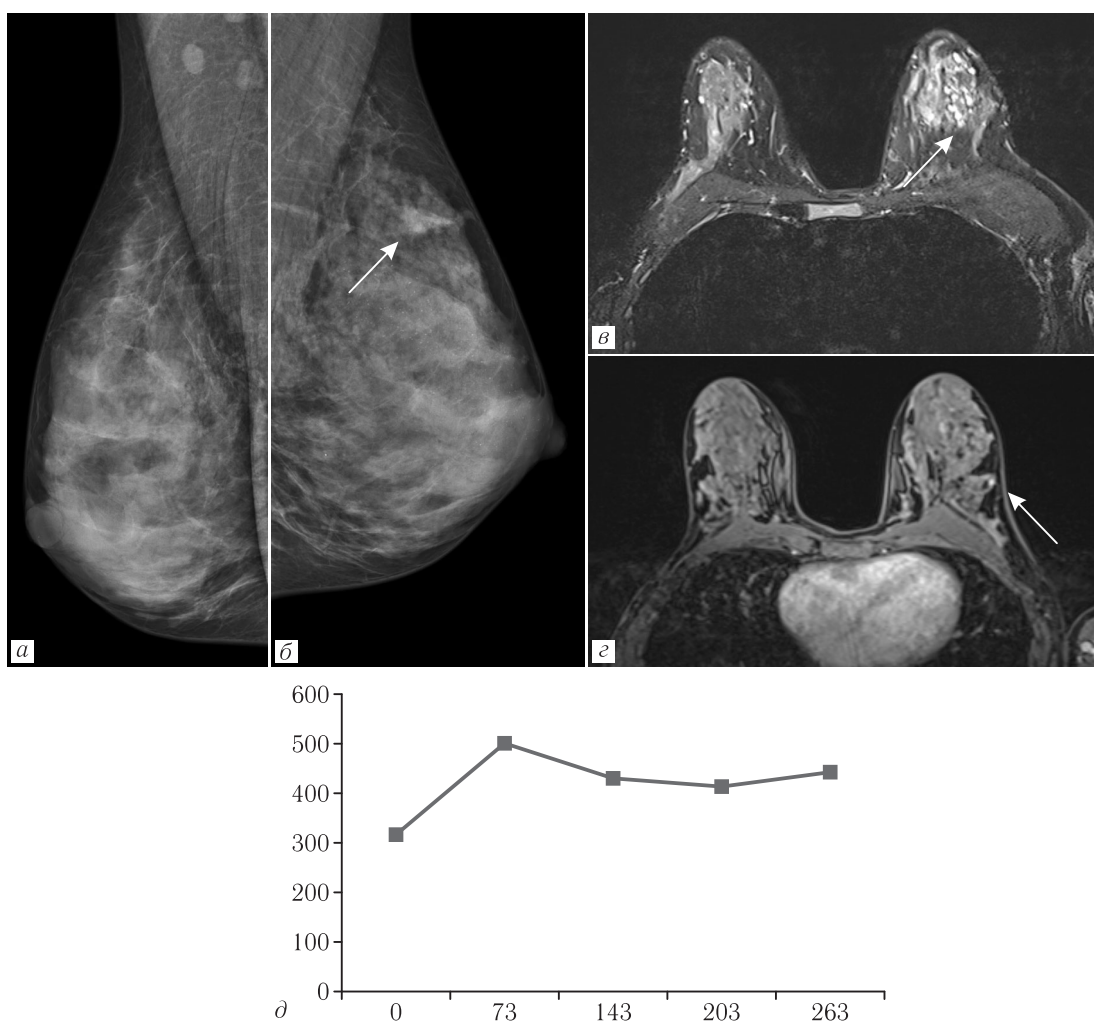


Рис. 1. а, б — Маммограммы правой и левой молочной железы в медиолатеральных косых проекциях: слева в верхненаружном квадранте определяется область асимметрии (стрелка); в — T2-TSE МР-томограмма с жироподавлением: в зоне асимметрии определяется участок железистой паренхимы с наличием гиперинтенсивных включений (расширенных протоков); г — постконтрастное T1-FL3D-SPAIR МР-изображение (через 45 с после начала болюса): определяется зона накопления контрастного вещества небольших размеров (4 мм; стрелка);

д — кривая кинетики контрастирования (II тип; по оси абсцисс — время в секундах)

Fig. 1. а, б — Mediolateral oblique mammography images of right and left breast show the asymmetric density in the left upper-outer quadrant (arrow); в — T2-TSE MR-image with fat saturation: in the area of asymmetry there is an island of glandular parenchyma with hyperintense spots (dilated ducts); г — post-contrast T1-FL3D-SPAIR MR-image (45 s after the bolus start): there is a small area of contrast uptake (4 mm; arrow); д — Enhancement kinetics curve (ACR II type; axis OX — time [seconds])

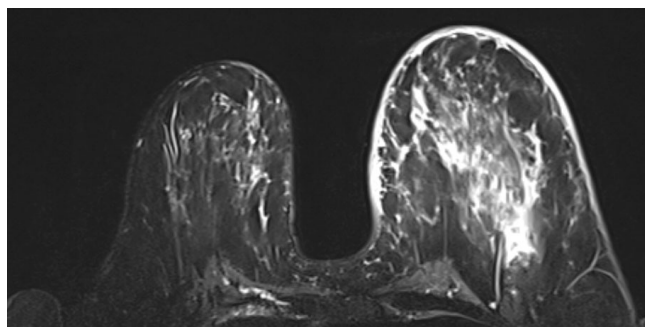


Рис. 2. T2-TSE МР-томограмма с жироподавлением: определяются увеличение размеров и диффузный отек паренхимы, подкожной клетчатки и кожи левой молочной железы у пациентки с отечно-инфильтративным раком молочной железы

Fig. 2. T2-TSE MR-image with fat saturation: there is an edema of parenchyma, subcutaneous fat and skin of the left breast in women with inflammatory breast carcinoma. The left breast is enlarged

рии было обусловлено инвазивным РМЖ, в таких случаях регистрировались типичные МР-признаки злокачественного процесса (рис. 3).

Доброкачественные образования (кисты, фиброаденомы, гранулемы, абсцессы, гематомы, хронические маститы, интрамаммарные лимфоузлы и т.д.) становились причиной асимметрий МЖ в 22,81% (13 из 57) наблюдений. В большинстве случаев при этом отмечались типичные признаки доброкачественных образований, однако в ряде случаев, например, при олеогранулемах, ставших причиной асимметрии, могли отмечаться признаки злокачественности (рис. 4, 5).

Динамика контрастирования

У 28 (49,12%) из 57 пациенток отмечалось накопление контраста в зоне асимметрии. При этом быстрое накопление контраста (типы ACR II и III) отмечалось в 50,00% (14 из 28) случаев.

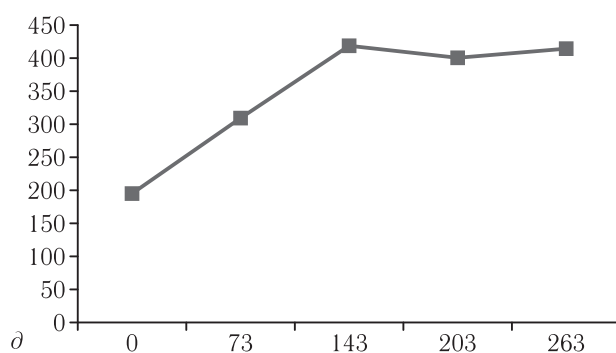
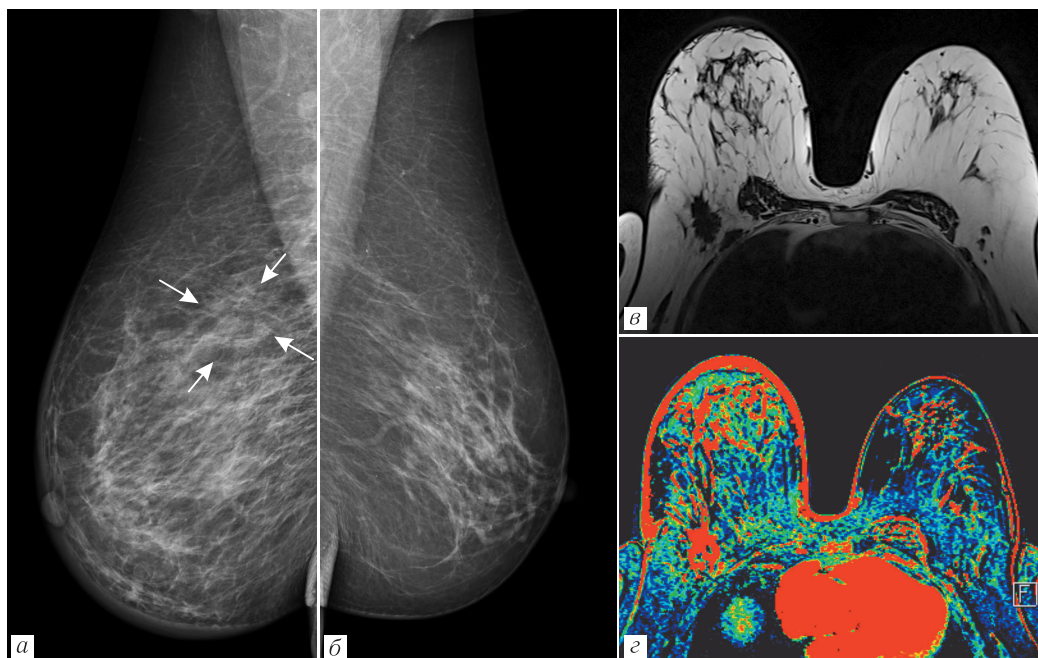


Рис. 3. а, б — Маммограммы правой и левой молочной железы в медиолатеральных косых проекциях: справа в верхненаружном квадранте определяется область асимметрии (стрелки); в — T2-TSE МР-томограмма: в зоне асимметрии определяется гиподенсивное спикюлированное образование (стрелка); г — цветовая карта накопления контрастного вещества: образование (стрелка) накапливает контрастное вещество; д — кривая кинетики контрастирования (II тип; по оси абсцисс — время в секундах)

Fig. 3. а, б — Mediolateral oblique mammography images of right and left breast show the asymmetric density in the right upper-outer quadrant (arrows); в — T2-TSE MR-image: in the area of asymmetry there is a hypodense speculated lesion (arrow); г — Color map of contrast uptake: the lesion (arrow) uptakes the contrast; д — Enhancement kinetics curve (ACR II type; axis OX — time [seconds])



Рис. 4. *а, б* — Маммограммы правой и левой молочной железы в медиолатеральных косых проекциях: справа в верхненаружном квадранте определяется область асимметрии (стрелки); *в* — T2-TSE МР-томограммы с жироподавлением: в зоне асимметрии определяется участок железистой паренхимы с наличием гиперинтенсивных включений; *г, д* — диффузионно-взвешенное МР-изображение (ep2d_diff_SPAIR с В-фактором=900) и ADC-карта: образования, выявленные на T2-изображении, остаются гиперинтенсивными (мелкие кисты; стрелки)

Fig. 4. *a, б* — Mediolateral oblique mammography images of right and left breast show the asymmetric density in the right upper-outer quadrant (arrows); *в* — T2-TSE MR-image with fat saturation: in the area of asymmetry there is an island of glandular parenchyma with hyperintense spots; *г, д* — diffusion-weighted MR-image (ep2d_diff_SPAIR with B-factor 900) и ADC-map: lesions found on T2-image remain hyperintense (small cysts; arrows)

ACR I тип кинетической кривой (медленное постепенное накопление контраста) имел место в 14 из 28 (50,00%) случаев и во всех случаях соответствовал доброкачественным изменениям, поэтому данный тип кинетической кривой характеризовался 100% прогностической ценностью положительного результата в отношении доброкачественной природы асимметрии.

ACR II тип кинетической кривой (быстрое начальное контрастирование и плато в отсроченной фазе) был зафиксирован в 7 из 28 (25,00%) случаев и в 4 случаях соответствовал РМЖ, в результате чувствительность и специфичность данного типа кинетической кривой в отношении асимметрий, обусловленных РМЖ, составили 60,0% и 82,61% соответственно.

ACR III тип (быстрое начальное контрастирование и вымывание в отсроченной фазе) имел место у 7 из 28 (25,00%) пациенток, из которых у 2 был верифицирован РМЖ. В результате чувствительность и специфичность данного типа кинетической

кривой в отношении асимметрий, обусловленных РМЖ, составили 40,00% ($p < 0,001$ по сравнению с ACR II типом) и 78,26% ($p = 0,053$ по сравнению с ACR II типом; таблица).

Обсуждение. Полученные в нашем исследовании данные о высокой чувствительности МРТ с ДК в выявлении инвазивного РМЖ, проявляющегося в виде асимметрий при маммографии, согласуются с рядом других работ. Это обстоятельство позволяет уверенно исключать инвазивный РМЖ при отсутствии накопления контрастного вещества в области интереса или неподозрительной кинетике этого процесса (I тип), не требуя морфологической верификации. С другой стороны, довольно давно известна проблема относительно низкой специфичности МРТ с ДК при исследованиях МЖ, что обусловлено широким кругом пролиферативных процессов, характерных для данного органа, особенно у женщин молодого возраста, которые встречаются часто и часто дают подозрительные варианты кинетики контрастирования [17].

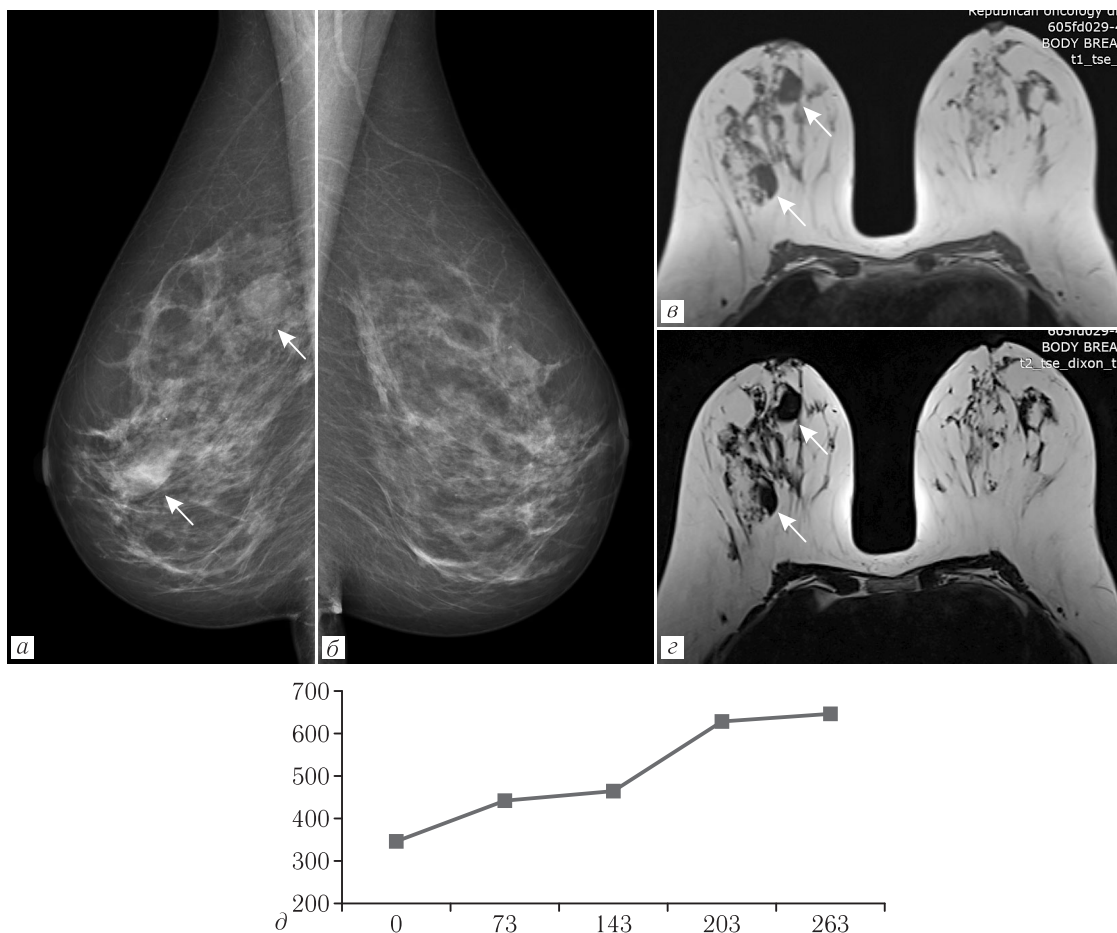


Рис. 5. *а, б* — Маммограммы правой и левой молочной железы в медиолатеральных косых проекциях: справа в позадиссосковой зоне и в верхненаружном квадранте определяются области асимметрии (стрелки); *в, г* — T1-TSE и T2-TSE МР-томограммы: в зонах асимметрии определяются гипоинтенсивные образования, характеризующиеся I типом кинетики контрастирования (δ ; по оси абсцисс — время в секундах). Гистология — фиброаденомы

Fig. 5. *a, б* — Mediolateral oblique mammography images of right and left breast show the two asymmetric densities in the right retroareolar area and in the upper-outer quadrant (arrows); *в, г* — T1-TSE и T2-TSE MR-image: in the area of asymmetries there were hypodense masses showing ACR I type of contrast enhancement (δ ; axis OX — time [seconds]). Histology report — fibroadenomas

Таблица

Сводная таблица кинетико-морфологических свойств маммографически выявляемых асимметрий молочных желез

Table

Summary table of MR contrast enhancement kinetics and morphological properties of mammographically revealed breast asymmetric densities

Морфологический тип	Тип кривой контрастирования				Всего
	отсутствие накопления	I	II	III	
Истинные асимметрии без объемного образования	14 (45,16%)	10 (32,26%)	3 (9,68%)	4 (12,9%)	31 (100%)
Физиологические асимметрии	14 (48,28%)	10 (34,48%)	2 (6,90%)	3 (10,34%)	29 (100%)
Асимметричный отек	—	—	1 (50,0%)	1 (50,0%)	2 (100%)
Истинные асимметрии с наличием объемного образования	11 (61,11%)	2 (11,11%)	3 (16,67%)	2 (11,11%)	18 (100%)
Рак молочной железы	—	—	3 (60,0%)	2 (40,0%)	5 (100%)
Доброкачественные образования	11 (84,62%)	2 (15,38%)	—	—	13 (100%)
Послеоперационные рубцы	4 (50,0%)	2 (25,0%)	1 (12,5%)	1 (12,5%)	8 (100%)
Всего	29 (50,88%)	14 (24,56%)	7 (12,28%)	7 (12,28%)	57 (100%)

Примечание: сумма процентов в строках может не соответствовать 100% ввиду округления.
Note: The percent sum in the lines may not correspond to 100% due to the rounding.

В нашем исследовании подозрительные паттерны контрастирования регистрировались и при отсутствии очаговых образований в зоне асимметрии, т.е. при асимметричном распределении рентгеноплотных тканей, основной причиной чего является фиброзно-кистозная болезнь (ФКБ) МЖ, при которой в 12–71% случаев могут проявляться зоны накопления контрастного вещества, не связанные с очаговым образованием, часто очагового или регионального характера, с медленным или умеренно быстрым подъемом и персистирующей или плато-подобной кинетикой отсроченного контрастного усиления [18]. Очаговые фиброзно-кистозные изменения могут демонстрировать подозрительную кинетику накопления контрастного вещества. В одном исследовании патоморфологический диагноз регионального неузлового усиления был равномерно распределен между фиброзно-кистозными изменениями и злокачественными новообразованиями, при этом неуловое усиление характеризовалось прогностическим значением положительного результата 42% как для фиброзно-кистозных изменений, так и для злокачественных образований с компонентом протоковой карциномы *in situ* [19]. В небольшом проценте случаев фиброзно-кистозные изменения описываются как соответствующие протоковому распределению зоны контрастного усиления, которое определяется как линейное неочаговое усиление, с ветвлением или без него, направленное к соску и выглядящее как соответствующее системе протоков МЖ. Этот тип распределения регистрируется в 3–18% случаев [20].

Другой возможной причиной ложноположительных результатов при МРТ МЖ являются воспалительные изменения, в частности, инфекционный мастит, при котором наиболее частой находкой при динамическом контрастном усилении является неуловое усиление (82–100%) с регионарным или мультирегионарным характером распределения (40–96%) и медленным или умеренным подъемом с персистирующей или плато-подобной отсроченной фазой в 43–98% случаев и реже — с быстрым начальном подъемом интенсивности с вымыванием (14–55% случаев). Характер контрастного усиления при остром мастите и воспалительном РМЖ перекрывается, вероятно, из-за ангиогенеза, вызванного как инфекционным воспалением, так и опухолью [21–23].

Также проблемой дифференциальной диагностики может быть псевдоангиоматозная стромальная гиперплазия (PASH), наиболее часто проявляющаяся при МРТ как не ассоциированная с очаговым образованием зона накопления контраста, что предположительно связано с наличием щелевидных анастомозирующих каналов, перемежающихся с узловой железисто-фиброзной тканью [24, 25]. Сопутствующая не ассоциированная с объемным образованием зона накопления контрастного вещества может иметь регионарное,

сегментарное или очаговое распределение с плато-подобной или персистирующей кинетикой усиления и часто требует биопсии для дифференцирования с РМЖ [26, 27].

Подозрительные варианты контрастирования доброкачественных очаговых изменений в нашем исследовании регистрировались при жировых некрозах, типично развивающихся после любых травм МЖ, включая операционную. Однако известно, что и другие доброкачественные образования могут ассоциироваться с подобными вариантами накопления контраста. Например, интрамаммарные лимфатические узлы, хотя и обычно характеризуются наличием жирового центра, овальной или почкообразной формой и четкими контурами без признаков центрального некроза или утолщения коркового слоя, в ряде случаев могут не иметь определяемого при МРТ четко выраженного жирового центра из-за ограничений пространственного разрешения метода. Кроме того, лимфатические узлы часто демонстрируют III тип кинетики контрастного усиления с интенсивным быстрым начальным подъемом и отсроченным вымыванием, в результате в таких случаях МРТ не может быть использована для достоверной дифференциации доброкачественного лимфатического узла от злокачественного образования, что обычно требует биопсии [28, 29]. Также ложноположительные результаты могут быть обусловлены идиопатическим гранулематозным маститом, представляющим собой редкий иммуноопосредованный хронический воспалительный процесс у женщин репродуктивного возраста, при котором не ассоциированное с очаговым образованием контрастное усиление наблюдается в 77% случаев. Кинетика усиления его — чаще медленная, или имеется умеренно быстрый подъем с последующим персистированием или плато-подобным отсроченным усилением, хотя может наблюдаться и III тип кинетической кривой [30].

Проблема жировых некрозов носит особенно актуальный характер при ятрогенных асимметриях (послеоперационных рубцах, которые, как было показано ранее, ассоциированы с повышением риска развития РМЖ [31]). Данный тип изменений подробно описан ранее [16] и не требует, по нашему мнению, отдельной характеристики применительно к варианту маммографического отображения.

Другой проблемой МРТ является относительно низкое пространственное разрешение, что обычно не позволяет уверенную визуализацию РМЖ *in situ* [17].

Ограничения исследования. Определенным ограничением нашего исследования может являться верификация отсутствия РМЖ данными минимум 3-летнего динамического наблюдения. Однако этот подход широко используется как в исследованиях, так и в клинической практике, например, для обоснования возможности изменения категории BI-RADS 3 на категорию BI-RADS 2 по данным маммо-

графии [32], и хорошо согласуется со сведениями о среднем времени удвоения относительно низко-агрессивных вариантов РМЖ, составляющем 1126 дней (3,1 года), 624 дня (1,7 года) и 254 дня (0,7 года) для люминального А, люминального В и нелюминального подтипов РМЖ [33]. Кроме того, в нашем исследовании проводилась дополнительная верификация отсутствия РМЖ по данным УЗИ, в результате вероятность ошибки (т.е. наличия РМЖ у пациенток с изменениями, расцененными как доброкачественные), как ожидается, составляет ниже 0,4–1,7% [32].

Также небольшой объем выборки исследования и частично ретроспективный его характер могут снижать его репрезентативность, однако в нем четко продемонстрирована особенность МРТ с ДК в виде низ-

кой специфичности факта выявления подозрительных паттернов контрастирования при высокой специфичности отрицательного результата. Вследствие этого целесообразным является изучение вариантов количественной оценки как пространственных, так и временных характеристик контрастирования, и попыток их классификации с использованием современных инструментов.

Заключение. В результате общая чувствительность МРТ с ДК в диагностике РМЖ на фоне маммографически выявляемых асимметрий составила 100%, специфичность — 69,57%. При этом отсутствие признаков накопления контрастного вещества в зоне асимметрии либо накопление контраста, описываемое кинетической кривой I типа, можно расценивать как свидетельство отсутствия инвазивного РМЖ.

Сведения об авторах:

Меринов Сергей Николаевич — врач-рентгенолог рентгеновского отделения государственного бюджетного учреждения «Республиканский клинический онкологический диспансер Республики Марий Эл»; 424036, Йошкар-Ола, ул. Осипенко, д. 22; e-mail: xhafabayer@yandex.ru; ORCID 0000-0001-5689-8815;

Пасынков Дмитрий Валерьевич — доктор медицинских наук, доцент, заведующий кафедрой лучевой диагностики и онкологии; заведующий рентгеновским отделением; 424036, Йошкар-Ола, ул. Осипенко, д. 22; e-mail: passynkov@mail.ru; ORCID 0000-0003-1888-2307;

Тухбатуллин Мунир Габдулфатович — доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой ультразвуковой диагностики Казанской государственной медицинской академии — филиала федерального государственного бюджетного образовательного учреждения дополнительного профессионального образования «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 420012, Казань, ул. Муштары, д. 11; e-mail: munir.tuhbatullin@tatar.ru; ORCID 0000-0002-0055-4746;

Михальцова Марина Алексеевна — врач-онколог отделения амбулаторной диагностики и лечения государственного бюджетного учреждения «Республиканский клинический онкологический диспансер Республики Марий Эл»; 424036, Йошкар-Ола, ул. Осипенко, д. 22; e-mail: marina-mikhaltsova@yandex.ru; ORCID 0009-0009-0844-3731;

Бусыгина Ольга Валерьевна — кандидат медицинских наук, кафедра лучевой диагностики и онкологии, доцент; врач-рентгенолог рентгеновского отделения государственного бюджетного учреждения «Республиканский клинический онкологический диспансер Республики Марий Эл»; 424036, Йошкар-Ола, ул. Осипенко, д. 22; e-mail: busygina.olga@inbox.ru; ORCID 0000-0001-7513-2217;

Романьева Екатерина Андреевна — врач-рентгенолог рентгеновского отделения государственного бюджетного учреждения «Республиканский клинический онкологический диспансер Республики Марий Эл»; 424036, Йошкар-Ола, ул. Осипенко, д. 22; e-mail: katerina.rrr@bk.ru; ORCID 0000-0002-0254-092X;

Петров Евгений Александрович — врач-онколог отделения амбулаторной диагностики и лечения государственного бюджетного учреждения «Республиканский клинический онкологический диспансер Республики Марий Эл»; 424036, Йошкар-Ола, ул. Осипенко, д. 22; e-mail: petr-jeka@mail.ru; ORCID 0009-0008-1980-6983.

Information about the authors:

Serguei N. Merinov — radiologist, department of radiology in Clinical Oncology Dispensary of Mari El Republic; e-mail: xhafabayer@yandex.ru. Mailing Address: 22 Osipenko St., 424036 Yoshkar-Ola, Russia; ORCID 0000-0001-5689-8815;

Dmitry V. Pasynkov — Dr. of Sci. (Med.), associate professor, head of the department of radiology and oncology in Mari State University, head of the department of radiology in Clinical Oncology Dispensary of Mari El Republic; e-mail: passynkov@mail.ru. Mailing Address: 22 Osipenko St., 424036 Yoshkar-Ola, Russia; ORCID 0000-0003-1888-2307;

Munir G. Tuhbatullin — Dr. of Sci. (Med.), Professor, Head of Department of Diagnostic Ultrasound, Kazan State Medical Academy — Branch Campus of the Russian Medical Academy of Continuous Professional Education, Russia, Kazan; SPIN 8560-1688; e-mail: munir.tuhbatullin@tatar.ru. Mailing Address: 11 Mushtari St, 420012 Kazan, Russia; ORCID 0000-0002-0055-4746;

Marina A. Mikhaltsova — oncologist, department of out-patient diagnostics and treatment in Clinical Oncology Dispensary of Mari El Republic; SPIN 5946-9603; e-mail: marina-mikhaltsova@yandex.ru. Mailing Address: 22 Osipenko St., 424036 Yoshkar-Ola, Russia; ORCID 0009-0009-0844-3731;

Olga V. Busygina — Cand. of Sci. (Med.), department of radiology and oncology in Mari State University, associate professor; radiologist, department of radiology in Clinical Oncology Dispensary of Mari El Republic; SPIN 4550-4393; e-mail: busygina.olga@inbox.ru. Mailing Address: 22 Osipenko St., 424036 Yoshkar-Ola, Russia; ORCID 0000-0001-7513-2217;

Katerina A. Romanycheva — radiologist, department of radiology in Clinical Oncology Dispensary of Mari El Republic; SPIN 4232-1106; Author ID (Scopus): 57190967121; e-mail: katerina.rrr@bk.ru. Mailing Address: 22 Osipenko St., 424036 Yoshkar-Ola, Russia; ORCID 0000-0002-0254-092X;

Evgeny A. Petrov — oncologist, department of out-patient diagnostics and treatment in Clinical Oncology Dispensary of Mari El Republic; SPIN 4519-1351; e-mail: petr-jeka@mail.ru. Mailing Address: 22 Osipenko St., 424036 Yoshkar-Ola, Russia; ORCID 0009-0008-1980-6983.

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства согласно международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распределен

следующим образом: концепция и план исследования — С.Н.Меринов, Д.В.Пасынков, М.Г.Тухбатуллин; сбор и математический анализ данных — С.Н.Меринов, М.А.Михальцова, О.В.Бусыгина, Е.А.Романыхева, Е.А.Петров; подготовка рукописи — С.Н.Меринов, Д.В.Пасынков, М.Г.Тухбатуллин.

Authors' contributions. All the authors met the ICMJE authorship criteria. Special contribution: *SNM, DVP, MGT* aided in the concept and plan of the study; *SNM, DVP, MGT* provided collection and mathematical analysis of data; *SNM, DVP, MGT* prepared the final manuscript version.

Потенциальный конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Disclosure: the authors declare that they have no competing interests.

Соответствие принципам этики: исследование одобрено Комитетом по этике Казанской государственной медицинской академии (протокол № 02/02 от 26 февраля 2026 г.). Информированное согласие получено от каждого пациента.

Adherence to ethical standards: the study was approved by the Ethics Committee of the Kazan State Medical Academy (Protocol No. 02/02 dated February 26, 2026). Informed consent was obtained from each patient.

Поступила/Received: 01.12.2025

Принята к печати/Accepted: 29.05.2026

Опубликована/Published: 29.06.2026

ЛИТЕРАТУРА/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. Vol. 71, No 3. P. 209–249. doi: 10.3322/caac.21660.
2. Arnold M., Morgan E., Rumgay H. et al. Current and future burden of breast cancer: Global statistics for 2020 and 2040 // *Breast.* 2022. Vol. 66. P. 15–23. doi: 10.1016/j.breast.2022.08.010.
3. Золотарев Н.Ю., Старинский В.В., Шахзадова А.О., Грецова О.П. Динамика основных показателей медицинской помощи населению Российской Федерации за 1993–2023 гг. по профилю «Онкология» // *Онкология. Журнал им. П.А.Герцена.* 2025. Т. 14, № 3. С. 71–77. [Zolotarev N.Yu., Starinsky V.V., Shakhzadova A.O., Grecova O.P. Dynamics of the main indicators of medical care to the population of the Russian Federation for the period 1993–2023 in the «Oncology» profile. *P.A. Herzen Journal of Oncology*, 2025, Vol. 14, No 3, pp. 71–77 (In Russ.).] <https://doi.org/10.17116/onkolog20251403171>.
4. Duffy S.W., Tabár L., Yen A.M. et al. Mammography screening reduces rates of advanced and fatal breast cancers: Results in 549,091 women // *Cancer.* 2020. Vol. 126, No. 13. P. 2971–2979. doi: 10.1002/cncr.32859.
5. van der Waal D., Ripping T.M., Verbeek A.L., Broeders M.J. Evidence for reducing cancer-specific mortality due to screening for breast cancer in Europe: A systematic review // *Eur. J. Cancer.* 2020. Vol. 127. P. 191–206. doi: 10.1016/j.ejca.2019.12.010.
6. Henderson J.T., Webber E.M., Weyrich M.S. et al. Screening for breast cancer: evidence report and systematic review for the US Preventive Services Task Force // *JAMA.* 2024. Vol. 331, No. 21. P. 1860–1895. doi: 10.1001/jama.2023.25844.
7. Duffy S.W., Vulkan D., Cuckle H. et al. Effect of mammographic screening from age 40 years on breast cancer mortality (UK Age trial): final results of a randomised, controlled trial // *Lancet Oncol.* 2020. Vol. 21, No. 9. P. 1165–1172. doi: 10.1016/S1470-2045(20)30398-e on digital breast tomosynthesis in breast cancer detection // *Breast.* 2013. Vol. 22, No. 2. P. 101–108.
8. Mann R.M., Kuhl C.K., Moy L. Contrast-enhanced MRI for breast cancer screening // *J. Magn. Reson Imaging.* 2019. Vol. 50, No. 2. P. 377–390.
9. Newell M.S. ACR BI-RADS® v2025 Manual. Reston, VA: American College of Radiology, 2025.
10. Пасынков Д.В., Меринов С.Н., Павликова О.А. и др. Маммографически определяемые асимметрии паренхимы молочных желез: причины и возможности их маммографической и ультразвуковой дифференциальной диагностики // *Acta Medica Eurasica.* 2023. № 4. С. 55–68. [Pasyankov D.V., Merinov S.N., Pavlikova O.A. et al. Mammographically determined asymmetries of the mammary parenchyma: causes and opportunities of their mammographic and ultrasound differential diagnosis. *Acta Medica Eurasica*, 2023, No. 4, pp. 55–68 (In Russ.).]
11. Leung J.W., Sickles E.A. Developing asymmetry identified on mammography: correlation with imaging outcome and pathologic findings // *AJR Am. J. Roentgenol.* 2007. Vol. 188, No. 3. P. 667–675. doi: 10.2214/AJR.06.0413.
12. Yan J., Jiaren M. Comparative study of mammography and breast ultrasound in the diagnosis of breast cancer in young women: A meta-analysis // *Journal of Radiation Research and Applied Sciences.* 2025. Vol. 18, No. 3. P. 101767. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2025.101767>.
13. Saslow D., Boetes C., Burke W. et al. American Cancer Society guidelines for breast screening with MRI as an adjunct to mammography // *CA Cancer J. Clin.* 2007. Vol. 57, No. 2. P. 75–89. doi: 10.3322/canjclin.57.2.75.
14. Mann R.M., Balleyguier C., Baltzer P.A. et al. Breast MRI: EUSOBI recommendations for women's information // *Eur. Radiol.* 2015. Vol. 25, No. 12. P. 3669–3678. doi: 10.1007/s00330-015-3807-z.
15. Бусыгина О.В., Тухбатуллин М.Г., Пасынков Д.В. Диагностическая ценность магнитно-резонансной томографии с динамическим контрастированием в оценке состояния рубцов молочной железы после вмешательств по поводу доброкачественной патологии // *Acta medica Eurasica.* 2023. № 4. С. 18–30. [Busygina O.V., Tukhbatullin M.G., Pasyankov D.V. Diagnostic value of magnetic resonance imaging with dynamic contrasting in assessing the condition of breast scars after interventions for benign pathology. *Acta medica Eurasica*, 2023, No. 4, pp. 18–30 (In Russ.).] doi: 10.47026/2413-4864-2023-4-18-30.
16. Sharma S., Vicenty-Latorre F.G., Elsherif S., Sharma S. Role of MRI in Breast Cancer Staging: A Case-Based Review // *Cureus.* 2021. Vol. 13, No. 12. P. e20752. doi: 10.7759/cureus.20752.
17. Jansen S.A., Shimauchi A., Zak L. et al. The diverse pathology and kinetics of mass, nonmass, and focus enhancement on MR imaging of the breast // *J. Magn. Reson. Imaging.* 2011. Vol. 33, No. 6. P. 1382–1389. doi: 10.1002/jmri.22567.
18. Stojkovic B., Bojanic K., Koomen M. et al. Breast Dynamic Contrast Enhanced MRI: Fibrocystic Changes Presenting as a Non-mass Enhancement Mimicking Malignancy // *Open Med. (Wars).* 2017. Vol. 12. P. 288–294. doi: 10.1515/raon-2017-0016.

20. Van den Bosch M.A., Daniel B.L., Mariano M.N. et al. Magnetic resonance imaging characteristics of fibrocystic change of the breast // *Invest. Radiol.* 2005. Vol. 40. P. 436–441. doi: 10.1097/01.rli.0000167123.26334.c8.
21. Yuen S., Uematsu T., Kasami M. et al. Breast carcinomas with strong high-signal intensity on T2-weighted MR images: pathological characteristics and differential diagnosis // *J. Magn. Reson. Imaging.* 2007. Vol. 25, No. 3. P. 502–510. doi: 10.1002/jmri.20845.
22. Rieber A., Tomczak R., Mergo P.J. et al. MRI of the breast in the differential diagnosis of mastitis versus inflammatory carcinoma and in monitoring of the inflammatory process during treatment // *Eur. Radiol.* 1997. Vol. 7, No. 7. P. 1207–1214. doi: 10.1097/00004728-199701000-00025.
23. Tan H., Li R., Peng W. et al. Radiological and clinical features of adult non-puerperal mastitis // *Br. J. Radiol.* 2013. Vol. 86. P. 2012065. doi: 10.1259/bjr.20120657.
24. Jones K.N., Glazebrook K.N., Reynolds C. Pseudoangiomatous stromal hyperplasia: imaging findings with pathologic and clinical correlation // *AJR Am. J. Roentgenol.* 2010. Vol. 195, No. 4. P. 1036–1042. doi: 10.2214/AJR.09.3284.
25. Speer M.E., Yoon E.C., Berg W.A., Chang Sen L.Q. Pseudoangiomatous Stromal Hyperplasia: Radiologic-Pathologic Correlation // *J. Breast Imaging.* 2023. Vol. 5, No. 1. P. 67–72. doi: 10.1093/jbi/wbac051.
26. Alikhassi A., Skarpathiotakis M., Lu F.L., Curpen B. Pseudoangiomatous stromal hyperplasia of the breast, imaging and clinical perspective: A review // *Breast Dis.* 2023. Vol. 42, No. 1. P. 147–153. doi: 10.3233/BD-220072.
27. Nia E.S., Adrada B.E., Whitman G.J. et al. MRI features of pseudoangiomatous stromal hyperplasia with histopathological correlation // *Breast J.* 2021. Vol. 27, No. 3. P. 188–197. doi: 10.1111/tbj.14154.
28. Luciani M.L., Evans A.J., Gillan M.G. et al. Intramammary lymph nodes: normal and abnormal multimodality imaging features // *Br. J. Radiol.* 2019. Vol. 92, No. 1104. P. 20190517. doi: 10.1259/bjr.20190517.
29. Ko E.S., Han B.K., Kim R.B. et al. MRI Features for Prediction Malignant Intra-Mammary Lymph Nodes: Correlations with Mammography and Ultrasound // *Investig. Magn. Reson. Imaging.* 2022. Vol. 26, No. 2. P. 135–144. doi: 10.13104/imri.2022.26.2.135.
30. Gunduz Y., Altintoprak F., Tatli Ayhan L. et al. Effect of topical steroid treatment on idiopathic granulomatous mastitis: clinical and radiologic evaluation // *Breast J.* 2014. Vol. 20. P. 586–591. doi: 10.1111/tbj.12335.
31. Ключин И.В., Пасынков Д.В., Бусыгина О.В., Пасынкова О.О. К вопросу о возможном повышении риска рака молочной железы у пациенток, перенесших оперативные вмешательства на ней по поводу доброкачественной патологии // *Казанский медицинский журнал.* 2015. Т. 96, № 3. С. 316–321. [Klyushkin I.V., Pasyunkov D.V., Busygina O.V., Pasyunkova O.O. On the possibility of an increased risk of breast cancer in patients who underwent breast surgeries for benign diseases. *Kazan medical journal*, 2015, Vol. 96, No 3, pp. 316–321 (In Russ.).] doi: 10.17750/KMJ2015-316.
32. Jang J.Y., Kim S.M., Kim J.H. et al. Clinical significance of interval changes in breast lesions initially categorized as probably benign on breast ultrasound // *Medicine (Baltimore).* 2017. Vol. 96, No. 12. P. e6415. doi: 10.1097/MD.00000000000006415.
33. Fischer U. Tumor Growth Rate of Luminal and Nonluminal Invasive Breast Cancer Calculated on MRI Imaging // *Clin. Breast Cancer.* 2025. Vol. 25, No. 5. P. 422–430. doi: 10.1016/j.clbc.2025.02.008.

Открыта подписка на 2-е полугодие 2026 года.

Подписной индекс:

«Урал Пресс» (Пресса России) **014023**

ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ ТОЧНОСТЬ И СОГЛАСОВАННОСТЬ ИИ-СЕРВИСОВ МЕЖДУ СОБОЙ И С ВРАЧОМ-ЭКСПЕРТОМ ПРИ ОЦЕНКЕ МАММОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ШКАЛЕ BI-RADS: РЕТРОСПЕКТИВНОЕ АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

^{1,2}А. С. Азарян[✉], ¹М. Ю. Хрустачева[✉], ^{1,3}Л. Д. Пестренин[✉], ¹Ю. А. Васильев[✉], ^{1,4}А. В. Владзимирский[✉],
^{1,3}О. В. Омелянская[✉], ¹А. С. Доможирова[✉], ^{1,3,5}К. М. Арзамасов[✉], ¹А. С. Гацук[✉]

¹Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий, Москва, Россия

²Центральная государственная медицинская академия, Москва, Россия

³МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, Россия

⁴Первый Московский государственный медицинский университет имени И. М. Сеченова, Москва, Россия

⁵Самарский государственный медицинский университет, Самара, Россия

ВВЕДЕНИЕ: По данным литературы, диагностическая точность маммографических ИИ-сервисов при определении категории BI-RADS может колебаться в достаточно широком диапазоне. При этом отсутствуют исследования, посвященные оценке согласованности между ИИ-сервисами и врачом-рентгенологом при определении категории BI-RADS.

ЦЕЛЬ: Оценить диагностическую точность и согласованность трех ИИ-сервисов между собой и с врачом-экспертом при оценке маммографических исследований по шкале BI-RADS.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ: Выполнено смешанное исследование, включавшее ретроспективный диагностический и аналитический компоненты. В анализ вошли 99 анонимизированных маммографических исследований. Исследования оценивались врачом-экспертом с определением категории BI-RADS 1–5 отдельно для правой и левой молочной железы; полученные оценки использовались в качестве референсного стандарта. Набор данных был обработан тремя коммерческими ИИ-сервисами, также определявшими категории BI-RADS 1–5.

Статистика: Статистический анализ проводился на уровне отдельных молочных желёз ($n=198$). Оценивали ROC AUC, чувствительность, специфичность и точность с 95% доверительными интервалами для двух бинарных шкал BI-RADS: BI-RADS 1–3 против 4–5 и BI-RADS 1–2 против 3–5. Согласованность между ИИ-сервисами и врачом-экспертом оценивали с помощью внутриклассовой корреляции и каппы Коэна. Для сравнения диагностических показателей применяли тест Мак-Немара, для оценки различий согласованности — bootstrap-анализ с 5000 повторений.

РЕЗУЛЬТАТЫ: Оценки диагностической точности представлены в виде диапазонов значений, полученных для отдельных ИИ-сервисов, оценки согласованности включают значения, полученные для отдельных пар ИИ-сервисов или пар «ИИ-сервис + врач». Диагностическая точность ИИ-сервисов по бинарной шкале BI-RADS № 1: ROC AUC — 0,644–0,876, точность — 0,788–0,909, специфичность — 0,816–0,977, чувствительность — 0,333–0,883. По бинарной шкале BI-RADS № 2: ROC AUC — 0,795–0,915, точность — 0,808–0,939, специфичность — 0,818–0,961, чувствительность — 0,739–0,870. Согласованность между парами ИИ-сервисов по бинарной шкале BI-RADS № 1 находилась в диапазоне от 0,232 до 0,504, по бинарной шкале BI-RADS № 2 — от 0,416 до 0,663, по полной шкале BI-RADS — от 0,387 до 0,564. Согласованность между ИИ-сервисами и врачом-экспертом по бинарной шкале BI-RADS № 1 находилась в диапазоне от 0,288 до 0,641, по бинарной шкале BI-RADS № 2 — от 0,518 до 0,832, по полной шкале BI-RADS — от 0,570 до 0,701.

ОБСУЖДЕНИЕ: Диагностическая точность ИИ-сервисов по бинарной шкале BI-RADS № 1 и бинарной шкале BI-RADS № 2 соответствует диапазонам в аналогичных исследованиях. По сравнению с результатами нашего предыдущего исследования согласованность по бинарной шкале BI-RADS № 1, бинарной шкале BI-RADS № 2 и полной шкале оказалась в подавляющем большинстве случаев ниже, чем согласованность между врачами-рентгенологами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ: Полученные результаты подтверждают данные литературы, свидетельствующие о широких диапазонах колебаний диагностической точности ИИ-сервисов. С учетом различных шкал BI-RADS согласованность ИИ-сервисов и врача-эксперта оказалась в подавляющем большинстве случаев ниже, чем согласованность между врачами-рентгенологами, которую мы оценивали в предыдущем исследовании.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: маммография; искусственный интеллект; BI-RADS; точность; согласованность; рак молочной железы

* Для корреспонденции: Азарян Авет Сергеевич, e-mail: Dr.Azaryan@yandex.ru

Для цитирования: Азарян А.С., Хрустачева М.Ю., Пестренин Л.Д., Васильев Ю.А., Владзимирский А.В., Омелянская О.В., Доможирова А.С., Арзамасов К.М., Гацук А.С. Диагностическая точность и согласованность ИИ-сервисов между собой и с врачом-экспертом

при оценке маммографических исследований по шкале BI-RADS: ретроспективное аналитическое исследование // Лучевая диагностика и терапия. 2026. Т. 17, № 2. С. 86–97, doi: <http://doi.org/10.22328/2079-5343-2026-17-2-86-97>.

DIAGNOSTIC ACCURACY AND AGREEMENT OF AI SERVICES AMONG THEMSELVES AND WITH MEDICAL EXPERT IN EVALUATING MAMMOGRAPHY USING THE BI-RADS SCALE: A RETROSPECTIVE ANALYTICAL STUDY

^{1,2}Avet S. Azaryan[✉], ¹Margarita Yu. Khrustacheva[✉], ^{1,3}Lev D. Pestrenin[✉], ¹Yuriy A. Vasilev[✉],
^{1,4}Anton V. Vladzimirsky[✉], ¹Olga V. Omelyanskaya[✉], ¹Alla S. Domozhirova[✉], ^{1,3,5}Kirill M. Arzamasov[✉],
¹Anderei S. Gatsuk[✉]

¹Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies, Moscow, Russia

²Central State Medical Academy of Department of Presidential Affairs, Moscow, Russia

³MIREA — Russian Technological University, Moscow, Russia

⁴I. M. Sechenov First Moscow State Medical University, Moscow, Russian

⁵Samara State Medical University, Samara, Russia

INTRODUCTION: According to the literature, the diagnostic accuracy of mammographic AI services in determining the BI-RADS category can vary quite widely. However, there are no studies that evaluate agreement between AI systems and radiologists in determining the BI-RADS category.

OBJECTIVE: Evaluation of the diagnostic accuracy and agreement of three AI systems with each other and with an expert reader in mammographic examinations through BI-RADS.

MATERIALS AND METHODS: A mixed study was performed, which included retrospective diagnostic and analytical components. The analysis included 99 anonymized mammographic studies. The studies were evaluated by an expert reader with the definition of BI-RADS 1–5 categories separately for the right and left breast; the scores obtained were used as a reference standard. The data set was processed by three commercial AI services, which also identified BI-RADS 1–5 categories.

Statistics: Statistical analysis was performed at the level of individual breasts ($n=198$). ROC AUC, sensitivity, specificity, and accuracy were evaluated with 95% confidence intervals for two binary BI-RADS scales: BI-RADS 1–3 vs. 4–5 and BI-RADS 1–2 vs. 3–5. Agreement was calculated using the Pearson and Cohen intraclass correlation method for similar scales and the full BI-RADS scale. The McNemar test was used to compare diagnostic parameters, and a bootstrap analysis with 5,000 repetitions was used to assess consistency differences.

RESULTS: Diagnostic accuracy estimates are presented as ranges of values obtained for individual AI services, and consistency estimates include values obtained for individual pairs of AI services or pairs of «AI service + reader». Diagnostic accuracy of AI services on the BI-RADS binary scale No. 1: ROC AUC — 0.644–0.876, accuracy — 0.788–0.909, specificity — 0.816–0.977, sensitivity — 0.333–0.883. According to the BI-RADS No. 2 binary scale: ROC AUC — 0.795–0.915, accuracy — 0.808–0.939, specificity — 0.818–0.961, sensitivity — 0.739–0.870. Agreement between pairs of AI services on the BI-RADS binary scale No. 1 ranged from 0.232 to 0.504, on the BI-RADS binary scale No. 2 — from 0.416 to 0.663, on the full BI-RADS scale — from 0.387 to 0.564. Agreement between AI services and an expert reader on the binary scale BI-RADS No. 1 ranged from 0.288 to 0.641, on the binary scale BI-RADS No. 2 — from 0.518 to 0.832, on the full BI-RADS scale — from 0.570 to 0.701.

DISCUSSION: The diagnostic accuracy of AI services on the BI-RADS No. 1 binary scale and BI-RADS No. 2 binary scale corresponded to the ranges in similar studies. Compared to the results of our previous study, the agreement on the BI-RADS No. 1 binary scale, BI-RADS No. 2 binary scale, and the full scale was in the vast majority of cases was lower than the agreement between radiologists.

CONCLUSION: In most cases, there were no statistically significant differences between the diagnostic accuracy parameters of the AI services calculated for the BI-RADS binary scale No. 1 and No. 2. There were also no statistically significant differences in the agreement between pairs of AI services and between AI services and an expert doctor, depending on the type of BI-RADS scale. Considering the various BI-RADS scales, the agreement between AI services and an expert reader was in the vast majority of cases lower than the agreement between radiologists that we evaluated in a previous study.

KEYWORDS: mammography; artificial intelligence; BI-RADS; accuracy; agreement; breast cancer

* For correspondence: Avet S. Azaryan, e-mail: Dr.Azaryan@yandex.ru

For citation: Azaryan A.S., Khrustacheva M.Yu., Pestrenin L.D., Vasilev Yu.A., Vladzimirsky A.V., Omelyanskaya O.V., Domozhirova A.S., Arzamasov K.M., Gatsuk A.S. Diagnostic accuracy and agreement of AI services among themselves and with medical expert in evaluating mammography using the BI-RADS scale: a retrospective analytical study // *Diagnostic radiology and radiotherapy*. 2026. Vol. 17, No. 2. P. 86–97, <http://doi.org/10.22328/2079-5343-2026-17-2-86-97>.

Введение. Доля впервые выявленных случаев рака молочной железы увеличивается с каждым годом, что делает злокачественные новообразования (ЗНО) молочной железы самым распространенным типом злокачественных новообразований среди женщин [1]. При этом в России наблюдается рост активного выявления ЗНО молочных желез с 37,2% до 44% [2]. Рак молочной железы остается ведущей онкологической патологией у женского населения Российской Федерации, его вклад в структуру смертности женщин от злокачественных новообразований составляет около 15,9% [1, 3].

Маммографический скрининг рака молочной железы представляет собой эффективную меру для выявления ЗНО на ранней стадии и, таким образом, способствует снижению смертности [4]. Все маммографические исследования обязательно оцениваются по шкале BI-RADS. Оценки BI-RADS 1 и 2 соответствуют отрицательному результату в отношении ЗНО молочной железы. При BI-RADS 3 вероятность наличия ЗНО составляет более 0 и до 2%, при таком результате пациентам назначается наблюдение с 6-месячными интервалами и динамической маммографией. BI-RADS 4 и 5 означают высокую вероятность ЗНО (от 2% до 95% и более 95% соответственно) и направляются к врачу-онкологу, который организует выполнение биопсии патологического образования [5].

В связи с дефицитом кадров в лучевой диагностике [6] активно разрабатываются базы данных с наличием и отсутствием ЗНО [7], и внедряются технологии искусственного интеллекта в том числе и для анализа маммографических исследований [8]. Однако, по данным научной литературы, диагностическая точность таких ИИ-сервисов может колебаться в достаточно широком диапазоне. Так, например, согласно ряду публикаций, ROC AUC может составлять от 0,613 до 0,994 [9–11].

Помимо этого, необходимо отметить, что в научной литературе обычно изучается согласованность ИИ-сервисов и врачей-рентгенологов только при оценке плотности молочных желез по шкале ACR [12–14], тогда как при оценке вероятности ЗНО по шкале BI-RADS согласованность до сих пор не изучалась.

В связи с вышеизложенным, представляются актуальными исследования, направленные на оценку диагностической точности и согласованности ИИ-сервисов при оценке маммографических исследований по шкале BI-RADS.

Цель. Оценить диагностическую точность и согласованность трех ИИ-сервисов между собой и с врачом-экспертом при оценке маммографических исследований по шкале BI-RADS.

Материалы и методы. Выполнено смешанное исследование (количественный компонент — ретроспективное диагностическое исследование, качественный компонент — аналитическое исследование).

Данное исследование основано на результатах Эксперимента по использованию инновационных технологий в области компьютерного зрения для анализа медицинских изображений и дальнейшего применения в системе здравоохранения города Москвы, утвержденного этическим комитетом (выписка из протокола № 2 НЭК МРО РОПР от 20 февраля 2020 года), также зарегистрированного на ClinicalTrials (NCT04489992). Информированное согласие получено от каждого пациента.

Набор данных. Из Единого радиологического информационного сервиса Единой медицинской информационно-аналитической системы Москвы (ЕРИС ЕМИАС) случайным образом было отобрано и выгружено 99 маммографических исследований, выполненных за период с 13.11.2020 по 04.10.2021.

Критерии включения: исследования выполнены пациентам женского пола в возрасте старше 18 лет.

Критерии исключения: маммограммы с артефактами на изображениях, маммограммы без категорий BI-RADS; маммограммы с BI-RADS 0 (поскольку это неполная оценка, требующая дополнительной визуализации); маммограммы с BI-RADS 6 (данная категория подразумевает наличие информации о гистологически подтвержденном ЗНО молочной железы, тогда как ИИ-сервисы анализируют только изображения и соответственно не определяют данную категорию).

Перед выгрузкой все исследования были анонимизированы. Далее для каждого исследования врач-эксперт (рентгенолог с опытом работы не менее 5 лет и ученой степенью/званием по специальности «Рентгенология») определил категорию по шкале BI-RADS 1–5 для правой и левой молочной железы.

Размер выборки обусловлен имеющимися в наличии исследованиями, полученными при подготовке наборов данных. Согласно методу определения объема выборки, предложенному Т.М. Бобровской и соавт., для оценки диагностической точности ИИ-сервисов в данном исследовании минимальный объем выборки должен составлять 80 исследований [15].

ИИ-сервисы. Подготовленный нами набор данных был обработан тремя ИИ-сервисами российских коммерческих компаний (АО «МЕДИЦИНСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ Лтд» (АО «МТЛ») — TrioDM (MTL), ООО «Медицинские скрининг системы» — Цельс ММГ, ООО «Платформа Третье Мнение» — Третье мнение ММГ), которые далее по тексту будут представлены в анонимизированном виде: ИИ-сервис «А», ИИ Сервис «В», ИИ Сервис «С».

Выбор ИИ-сервисов основывался на данных матрицы зрелости, которая используется в Московском эксперименте по использованию инновационных технологий в области компьютерного зрения для анализа медицинских изображений и дальнейшего применения этих технологий в системе здравоохранения (далее — московский эксперимент). Были

выбраны три ИИ-сервиса, которые продемонстрировали наибольшие значения клинической оценки.

С помощью данных ИИ-сервисов были определены категории BI-RADS 1–5 для каждой молочной железы.

Статистический анализ. Для оценки диагностической точности ИИ-сервисов были рассчитаны следующие параметры с 95% доверительными интервалами (ДИ): ROC AUC, чувствительность, специфичность, точность. Статистический анализ проводился на уровне отдельных молочных желёз (n=198). В качестве истинных значений (Ground Truth) использовались оценки врача-эксперта. Расчет параметров был выполнен с помощью веб-инструмента, разработанного ГБУЗ НПКЦ ДиТ ДЗМ (<https://roc-analysis.mosmed.ai>). Параметры диагностической точности рассчитывались для двух бинарных шкал BI-RADS.

внутриклассовой корреляции интерпретировались согласно шкале Landis и Koch: 0,81–1,00 — практически полная согласованность; 0,61–0,80 — существенная согласованность; 0,41–0,60 — умеренная согласованность, 0,21–0,40 — слабая согласованность, 0,00–0,20 — очень слабая согласованность.

Для оценки статистической значимости различий параметров диагностической точности использовался тест Мак-Немара, согласованности — метод отбора с возвратом (bootstrap) с количеством выборок равным 5000.

Результаты
1. Результаты оценки маммографических исследований врачом-экспертом. Средний возраст пациенток составил 56,0 лет.

Категории по шкале BI-RADS 1–5 для правой и левой молочной железы, определенные врачом-экспертом, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Распределение исследований по категориям полной шкалы BI-RADS в соответствии с оценками эксперта (абсолютные и относительные значения)

Table 1 Distribution of studies by categories of the full BI-RADS scale according to expert assessments (absolute and relative values)					
Локализация	BI-RADS 1	BI-RADS 2	BI-RADS 3	BI-RADS 4	BI-RADS 5
Правая молочная железа, абс. (%)	20 (20,2)	56 (56,6)	10 (10,1)	9 (9,1)	4 (4)
Левая молочная железа, абс. (%)	15 (15,1)	62 (62,7)	10 (10,1)	10 (10,1)	2 (2)

Бинарная шкала BI-RADS № 1: 0 — нет признаков ЗНО (BI-RADS 1, 2, 3), 1 — есть признаки ЗНО (BI-RADS 4, 5).

Бинарная шкала BI-RADS № 2: 0 — нет признаков ЗНО (BI-RADS 1, 2), 1 — есть признаки ЗНО (BI-RADS 3, 4, 5).

Для обеспечения сопоставимости наших результатов с результатами, представленными в научной литературе, мы также перевели полную шкалу BI-RADS в два вида бинарных шкал (табл. 2 и 3).

2. Параметры диагностической точности ИИ-сервисов. Параметры диагностической точно-

Таблица 2

Распределение исследований по категориям бинарной шкалы BI-RADS № 1 в соответствии с оценками эксперта (абсолютные и относительные значения)

Table 2 Distribution of studies by BI-RADS 1 binary scale categories according to expert assessments (absolute and relative values)		
Локализация	0 — нет признаков ЗНО (BI-RADS 1, 2, 3)	1 — есть признаки ЗНО (BI-RADS 4, 5)
Правая молочная железа, абс. (%)	86 (86,8)	13 (13,2)
Левая молочная железа	87 (87,8)	12 (12,2)

Для количественной оценки степени согласованности между различными ИИ-сервисами и врачом-экспертом при определении риска рака молочной железы молочной железы по шкале BI-RADS был применен метод внутриклассовой корреляции (Intraclass Correlation Coefficient, ICC) Пирсона. В нашем исследовании использовалась двусторонняя модель ICC с доверительными интервалами 95%, что соответствует рекомендациям по оценке согласованности между различными методами измерений. Также для оценки согласованности рассчитывалась каппа Коэна.

Внутриклассовая корреляция рассчитывалась для полной шкалы BI-RADS и для двух бинарных шкал, описание которых представлено выше. Значения

сти анализируемых ИИ-сервисов представлены в табл. 4.

При оценке ИИ-сервисов по обоим бинарным шкалам BI-RADS ИИ-сервис «В» продемонстрировал статистически значимо более высокую специфичность по сравнению с ИИ-сервисами «А» и «С» при оценке правой молочной железы. При оценке левой молочной железы специфичность ИИ-сервиса «В» также была статистически значимо выше, чем у ИИ-сервиса «А».

Точность ИИ-сервиса «В» оказалась статистически значимо выше точности ИИ-сервиса «А» при оценке по бинарной шкале BI-RADS № 2 для правой и левой молочных желез.

Таблица 3

Распределение исследований по категориям бинарной шкалы BI-RADS № 2 в соответствии с оценками эксперта (абсолютные и относительные значения)

Table 3

Distribution of studies by BI-RADS 2 binary scale categories according to expert assessments (absolute and relative values)

Локализация	0 — нет признаков ЗНО (BI-RADS 1, 2)	1 — есть признаки ЗНО (BI-RADS 3, 4, 5)
Правая молочная железа, абс. (%)	76 (76,8)	23 (23,2)
Левая молочная железа, абс. (%)	77 (77,8)	22 (22,2)

ROC AUC ИИ-сервиса «С» оказался статистически значимо выше, чем у ИИ-сервисов «А» и «В» только по бинарной шкале BI-RADS № 1 для левой молочной железы, тогда как в остальных случаях статистически значимые различия отсутствовали.

чески значимые различия наблюдались только для левой молочной железы (рис. 1).

Для значений каппы Коэна наблюдалась аналогичная картина. В целом значения каппы Коэна практически полностью соответствовали значениям

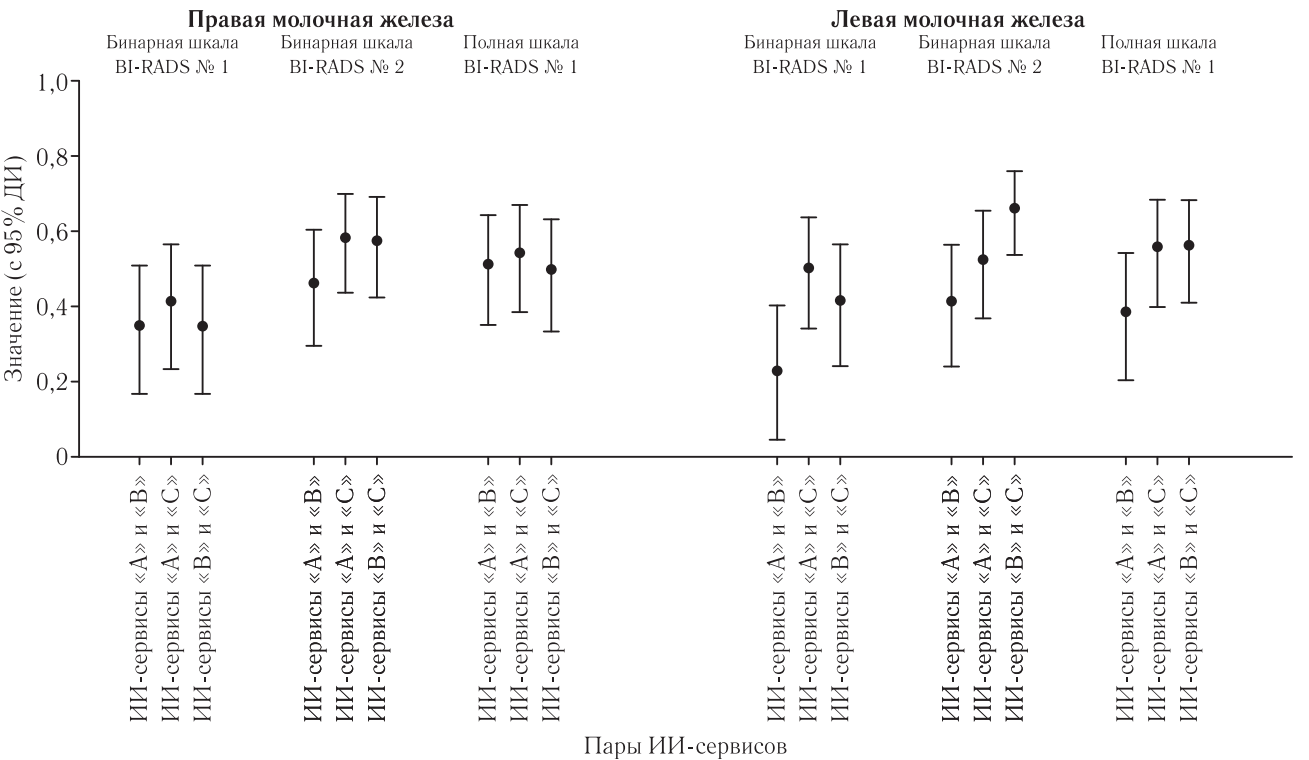


Рис. 1. Согласованность между ИИ-сервисами при оценке маммографических исследований по двум бинарным шкалам и полной шкале BI-RADS, рассчитанная методом внутриклассовой корреляции

Fig. 1. Agreement between AI services in assessing mammographic examinations using two binary scales and the full BI-RADS scale, calculated using the intraclass correlation method

В большинстве случаев чувствительность ИИ-сервисов статистически значимо не отличалась.

3. Согласованность ИИ-сервисов. Результаты оценки согласованности ИИ-сервисов между собой представлены в табл. 5.

По бинарной шкале BI-RADS № 1 согласованность ИИ-сервисов между собой, оценивавшаяся методом внутриклассовой корреляции, находилась в диапазоне от 0,232 до 0,504. По бинарной шкале BI-RADS № 2 согласованность находилась в диапазоне от 0,416 до 0,663. По полной шкале BI-RADS согласованность находилась в диапазоне от 0,387 до 0,564.

При оценке согласованности между ИИ-сервисами методом внутриклассовой корреляции статисти-

чески значимые различия наблюдались только для левой молочной железы (рис. 2).

Результаты оценки согласованности ИИ-сервисов с врачом-рентгенологом представлены в табл. 6.

По бинарной шкале BI-RADS № 1 согласованность ИИ-сервисов с врачом-экспертом, оценивавшаяся методом внутриклассовой корреляции, находилась в диапазоне от 0,288 до 0,641. По бинарной шкале BI-RADS № 2 согласованность находилась в диапазоне от 0,518 до 0,832. По полной шкале BI-RADS согласованность находилась в диапазоне от 0,570 до 0,701. Был выявлен ряд статистически значимых различий между уровнями согласованности. Так, например, по бинарной шкале BI-RADS № 2 согласованность ИИ-сервиса «В» с врачом

Таблица 4

Диагностическая точность ИИ-сервисов для бинарных шкал BI-RADS № 1 и BI-RADS № 2

Table 4

Diagnostic accuracy of AI services for binary scales BI-RADS No. 1 and BI-RADS No. 2

Молочная железа	Параметр	Бинарная шкала BI-RADS № 1						Бинарная шкала BI-RADS № 2					
		ИИ Сервис «А»	ИИ Сервис «В»	ИИ Сервис «С»	р для «А» и «В»	р для «А» и «С»	р для «В» и «С»	ИИ Сервис «А»	ИИ Сервис «В»	ИИ Сервис «С»	р для «А» и «В»	р для «А» и «С»	р для «В» и «С»
Правая	ROC AUC	0,744 (0,607–0,880)	0,758 (0,615–0,904)	0,744 (0,603–0,886)	0,878	1,000	0,896	0,812 (0,719–0,910)	0,915 (0,841–0,988)	0,804 (0,710–0,899)	0,121	0,850	0,064
	Точность	0,838 (0,766–0,911)	0,91 (0,866–0,973)	0,838 (0,766–0,911)	0,076	1,000	0,076	0,828 (0,754–0,903)	0,939 (0,892–0,986)	0,838 (0,766–0,911)	0,026	1,000	0,021
	Специфичность	0,872 (0,802–0,943)	0,977 (0,945–1,000)	0,872 (0,802–0,943)	0,011	1,000	0,003	0,842 (0,760–0,903)	0,961 (0,917–1,000)	0,868 (0,792–0,944)	0,022	0,790	0,039
	Чувствительность	0,615 (0,351–0,880)	0,538 (0,267–0,809)	0,615 (0,351–0,880)	1,000	1,000	1,000	0,783 (0,614–0,951)	0,870 (0,732–1,000)	0,739 (0,560–0,919)	0,726	1,000	0,453
Левая	ROC AUC	0,700 (0,544–0,852)	0,644 (0,505–0,779)	0,870 (0,757–0,993)	0,544	0,009	0,002	0,795 (0,699–0,896)	0,883 (0,800–0,969)	0,870 (0,783–0,957)	0,132	0,115	0,795
	Точность	0,788 (0,707–0,868)	0,879 (0,814–0,943)	0,909 (0,852–0,966)	0,078	0,004	0,581	0,808 (0,731–0,886)	0,919 (0,866–0,973)	0,899 (0,840–0,958)	0,034	0,063	0,774
	Специфичность	0,816 (0,735–0,897)	0,954 (0,910–0,998)	0,920 (0,862–0,977)	0,004	0,022	0,453	0,818 (0,732–0,904)	0,948 (0,898–0,998)	0,922 (0,862–0,982)	0,030	0,076	0,726
	Чувствительность	0,583 (0,304–0,862)	0,333 (0,067–0,600)	0,883 (0,662–1,000)	0,375	0,250	0,031	0,773 (0,598–0,948)	0,818 (0,657–0,979)	0,818 (0,657–0,979)	1,000	1,000	1,000

Примечание: в круглых скобках представлены значения 95% ДИ. Полуширным выделены значения $p < 0,05$.

Note: 95% CI values are shown in parentheses. Values in bold indicate $p < 0,05$.

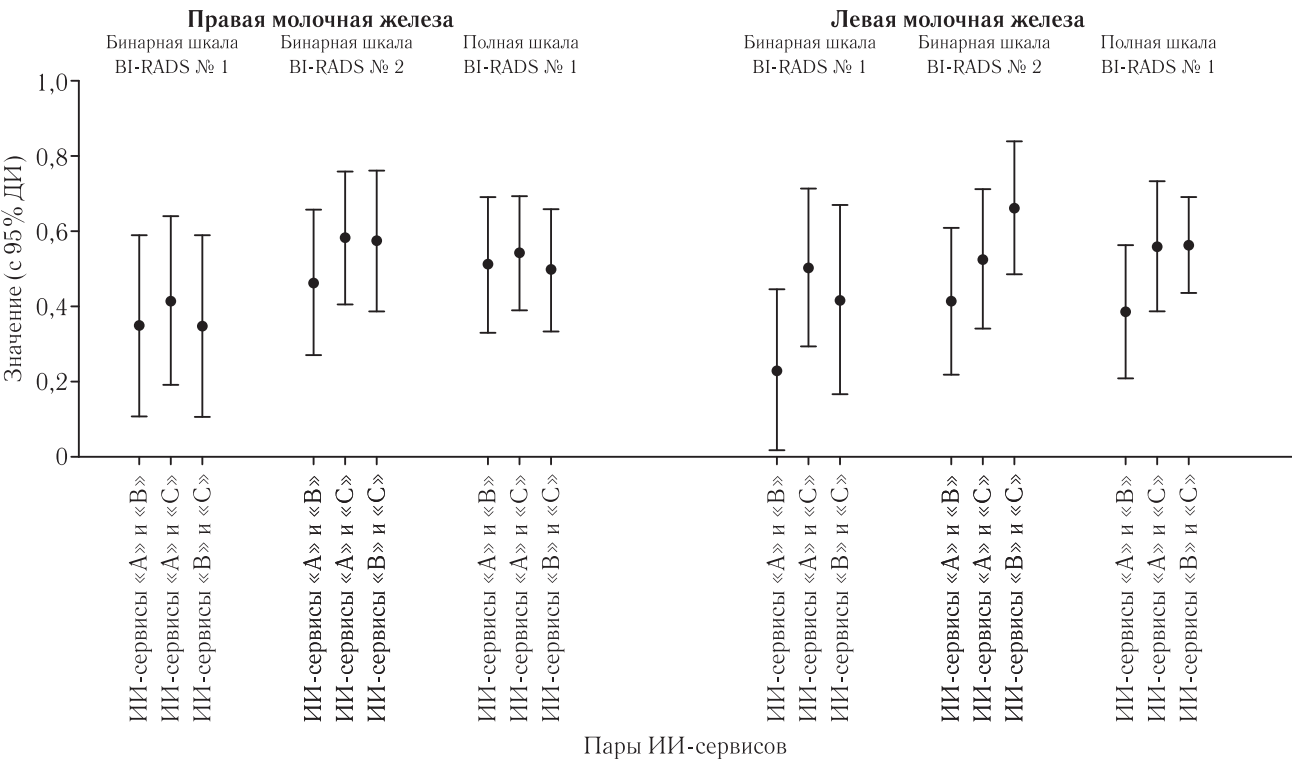


Рис. 2. Согласованность между ИИ-сервисами при оценке маммографических исследований по двум бинарным шкалам и полной шкале BI-RADS, рассчитанная методом каппы Коэна

Fig. 2. Agreement between AI services in assessing mammographic examinations using two binary scales and the full BI-RADS scale, calculated using Cohen's kappa method

была выше, чем согласованность ИИ-сервисов «А» и «С» с врачом для правой молочной железы, и выше, чем согласованность ИИ-сервиса «А» и «С» с врачом для левой молочной железы (рис. 3).

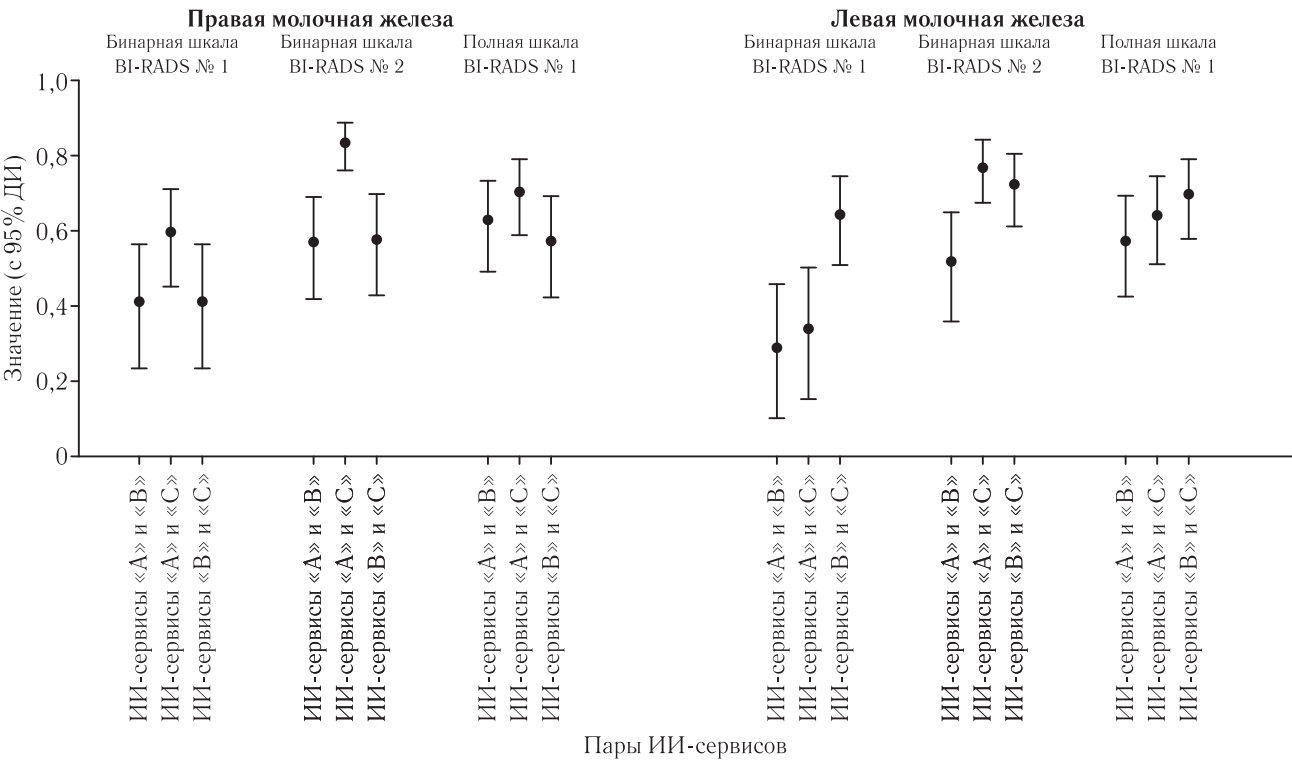


Рис. 3. Согласованность ИИ-сервисов с врачом-рентгенологом при оценке маммографических исследований по двум бинарным шкалам и полной шкале BI-RADS, рассчитанная методом внутриклассовой корреляции

Fig. 3. Agreement between AI services and a radiologist in assessing mammographic examinations using two binary scales and the full BI-RADS scale, calculated using the intraclass correlation method

Для значений каппы Коэна наблюдалась аналогичная картина. В целом значения каппы Коэна практически полностью соответствовали значениям внутрикласовой корреляции, но имели более широкие доверительные интервалы (рис. 4).

соответствует бинарной шкале BI-RADS № 2 в нашем исследовании. В таких работах ROC AUC находился в диапазоне от 0,620 до 0,940, точность — 0,720–0,877, специфичность — 0,370–0,970, чувствительность — от 0,706, до 0,870 [19–

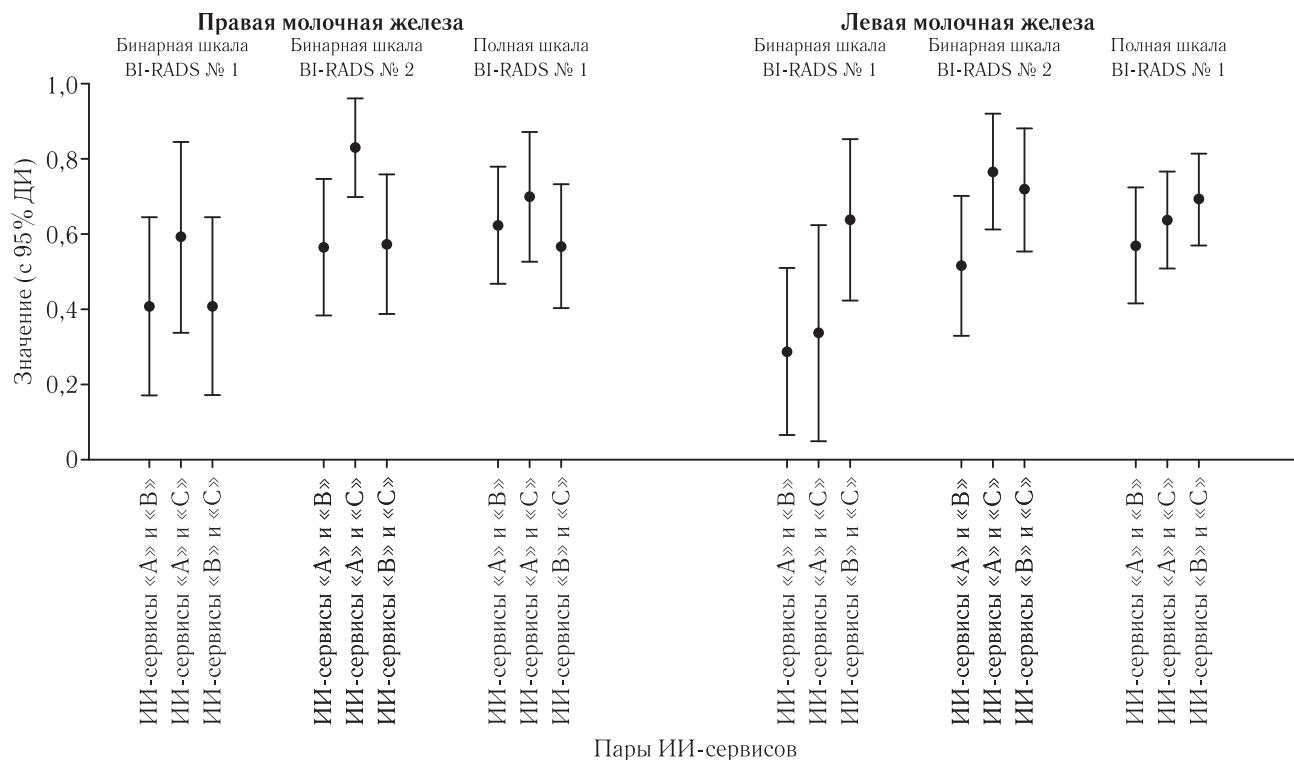


Рис. 4. Согласованность ИИ-сервисов с врачом-рентгенологом при оценке маммографических исследований по двум бинарным шкалам и полной шкале BI-RADS, рассчитанная методом каппы Коэна

Fig. 4. Agreement between AI services and a radiologist in assessing mammographic examinations using two binary scales and the full BI-RADS scale, calculated using Cohen's kappa method

Обсуждение

1. Диагностическая точность ИИ-сервисов.

В рамках нашего исследования было показано, что диапазоны параметров диагностической точности ИИ-сервисов по бинарной шкале BI-RADS № 1 были следующими: ROC AUC — 0,644–0,876, точность — 0,788–0,909, специфичность — 0,816–0,977, чувствительность — 0,333–0,883. При оценке по бинарной шкале BI-RADS № 2: ROC AUC — 0,795–0,915, точность — 0,808–0,939, специфичность — 0,818–0,961, чувствительность — 0,739–0,870.

В ряде научных публикаций авторы представили результаты оценки маммографических ИИ-сервисов по шкале, аналогичной бинарной шкале BI-RADS № 1, использовавшейся в нашем исследовании. В таких работах ROC AUC находился в диапазоне от 0,644 до 0,988, точность — 0,732–0,968, специфичность — 0,588–0,963, чувствительность — от 0,740, до 0,923 [16–18]. Наши результаты в целом соответствуют представленным диапазонам, однако один из ИИ-сервисов продемонстрировал аномально низкую чувствительность 0,333.

Однако в некоторых публикациях авторы при сведении полной шкалы BI-RADS к бинарной относят категорию 3 к группе «Есть признаки ЗНО», что

21]. Наши результаты соответствуют представленным диапазонам.

2. Согласованность ИИ-сервисов. По данным нашего исследования, согласованность ИИ-сервисов по бинарной шкале BI-RADS № 1 находилась в диапазоне от 0,232 до 0,504. По бинарной шкале BI-RADS № 2 согласованность ИИ-сервисов находилась в диапазоне от 0,416 до 0,663. По полной шкале BI-RADS согласованность ИИ-сервисов находилась в диапазоне от 0,387 до 0,564.

При оценке согласованности между ИИ-сервисами и врачом-экспертом по бинарной шкале BI-RADS № 1 согласованность находилась в диапазоне от 0,288 до 0,641. По бинарной шкале BI-RADS № 2 согласованность ИИ-сервисов находилась в диапазоне от 0,518 до 0,832. По полной шкале BI-RADS согласованность ИИ-сервисов находилась в диапазоне от 0,570 до 0,701.

По сравнению с результатами нашего предыдущего исследования, посвященного оценке согласованности между врачами-рентгенологами [22], согласованность ИИ-сервисов и врача-эксперта (0,288 до 0,641) по бинарной шкале BI-RADS № 1 оказалась во всех случаях ниже, чем согласованность между врачами-рентгенологами (0,810–0,941).

По бинарной шкале BI-RADS № 2 согласованность ИИ-сервисов и врача-эксперта (0,518 до 0,832) в большинстве случаев оказалась ниже согласованности между врачами-рентгенологами (0,788–0,911).

По полной шкале BI-RADS согласованность ИИ-сервисов и врача-эксперта (0,570 до 0,701) во всех случаях была ниже, чем согласованность между врачами-рентгенологами (0,836–0,963).

Интересным также представляется тот факт, что согласованность ИИ-сервисов и врача-эксперта в нашем исследовании находилась на уровне согласованности опытных рентгенологов (0,682 (95% ДИ 0,660–0,703)), полученном в исследовании Н. Тап и соавт. [16].

Оценивая уровни согласованности ИИ-сервисов и врача-эксперта, полученные в нашем исследовании, в целом, можно предположить, что более низкая согласованность по сравнению с врачами-рентгенологами, которую мы получили в предыдущем исследовании, может быть обусловлена тем, что ИИ-сервисы работают исключительно с маммографическими изображениями, тогда как врачи-рентгенологи обязательно имеют доступ к электронным медицинским картам пациентов и архиву исследований (при наличии).

Согласованность между ИИ-сервисами от умеренной до существенной может быть обусловлена несколькими факторами: размер и особенности разметки использовавшегося для обучения набора данных [23], особенности сетевой архитектуры ИИ-алгоритма [23, 24], пороговые значения [25] и др. Помимо этого, в масштабном исследовании, посвященном оценке 1537 ИИ-алгоритмов для анализа маммографических исследований, было показано, что при сопоставимой диагностической точности ИИ-алгоритмы могут быть более чувствительными к разным видам ЗНО молочных желез [26].

Ограничениями исследования можно считать использование заключения врача-эксперта в качестве референсного стандарта без гистологической верификации, относительно небольшой размер выборки для оценки согласованности (особенно

каппы Козна), а также невозможность детального анализа архитектурных особенностей коммерческих ИИ-сервисов.

Выводы

1. По бинарной шкале BI-RADS № 1 ROC AUC ИИ-сервисов находился в диапазоне 0,644–0,876, точность — 0,788–0,909, специфичность — 0,816–0,977, чувствительность — 0,333–0,883. По бинарной шкале BI-RADS № 2 ROC AUC ИИ-сервисов находился в диапазоне 0,795–0,915, точность — 0,808–0,939, специфичность — 0,818–0,961, чувствительность — 0,739–0,870. Полученные результаты подтверждают данные литературы, свидетельствующие о широких диапазонах колебаний диагностической точности ИИ-сервисов.

2. Согласованность между парами ИИ-сервисов находилась в диапазоне от слабой (0,232) до существенной (0,663). Согласованность между ИИ-сервисами и врачом-экспертом находилась в диапазоне от слабой (0,288) до практически полной (0,832).

3. С учетом различных шкал BI-RADS согласованность ИИ-сервисов и врача-эксперта оказалась в подавляющем большинстве случаев ниже, чем согласованность между врачами-рентгенологами, которую мы оценивали в предыдущем исследовании. Это может быть обусловлено тем, что ИИ-сервисы работают только с изображениями одного исследования, тогда как у врачей всегда есть доступ к архиву исследований и электронной медицинской карте пациентов.

Заключение. ИИ-сервисы продемонстрировали вариабельную диагностическую точность при оценке изменений молочных желез по бинарным шкалам BI-RADS, что согласуется с данными литературы. Согласованность между ИИ-сервисами, а также между ИИ-сервисами и врачом-экспертом варьировала от слабой до практически полной. При этом в большинстве случаев она была ниже ранее установленной межэкспертной согласованности врачей-рентгенологов, что может быть связано с ограничением ИИ-сервисов анализом только изображений одного исследования без учета архивных данных и информации электронной медицинской карты.

Сведения об авторах:

Азарян Авет Сергеевич — аспирант государственного бюджетного учреждения здравоохранения города Москвы «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы»; 127051, Москва, ул. Петровка, д. 24; ассистент кафедры рентгенологии и ультразвуковой диагностики федерального государственного бюджетного учреждения дополнительного профессионального образования «Центральная государственная медицинская академия» Управления делами Президента Российской Федерации, 121359, Москва, ул. Маршала Тимошенко д. 19, с. 1А; e-mail: Dr.Azaryan@yandex.ru; ORCID 0009–0007–8975–0017;

Хрустачева Маргарита Юрьевна — аспирант государственного бюджетного учреждения здравоохранения города Москвы «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы»; 127051, Москва, ул. Петровка, д. 24; e-mail: Myukhrustacheva@mail.ru; ORCID 0009–0001–1381–0809;

Пестренкин Лев Дмитриевич — младший научный сотрудник отдела медицинской информатики, радиомикрии и радиогеномики государственного бюджетного учреждения здравоохранения города Москвы «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы»; 127051, Москва, ул. Петровка, д. 24; e-mail: PestreninLD@zdrav.mos.ru; ORCID 0000–0002–1786–4329;

Васильев Юрий Александрович — доктор медицинских наук, директор государственного бюджетного учреждения здравоохранения города Москвы «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы»; 127051, Москва, ул. Петровка, д. 24; e-mail: nprcmr@zdrav.mos.ru; ORCID 0000–0002–5283–5961;

Владимирский Антон Вячеславович — доктор медицинских наук, заместитель директора по научной работе государственного бюджетного учреждения здравоохранения города Москвы «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы»; 127051, Москва, ул. Петровка, д. 24, e-mail: VladzimirskijAV@zdrav.mos.ru; ORCID 0000–0002–2990–7736;

Омелянская Ольга Васильевна — руководитель по управлению подразделениями Дирекции наука государственного бюджетного учреждения здравоохранения города Москвы «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы»; 127051, Москва, ул. Петровка, д. 24, e-mail: OmelyanskayaOV@zdrav.mos.ru; ORCID 0000–0002–0245–4431;

Доможирова Алла Сергеевна — доктор медицинских наук, председатель научной проблемной комиссии, ученый секретарь государственного бюджетного учреждения здравоохранения города Москвы «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы»; 127051, Москва, ул. Петровка, д. 24, e-mail: 2356563@mail.ru; ORCID 0000–0003–0806–3164;

Арзамасов Кирилл Михайлович — доктор медицинских наук, заведующий отдела медицинской информатики, радиомики и радиогеномики государственного бюджетного учреждения здравоохранения города Москвы «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы»; 127051, Москва, ул. Петровка, д. 24; e-mail: ArzamasovKM@zdrav.mos.ru; ORCID 0000–0001–7786–0349;

Гацук Андрей Сергеевич — младший научный сотрудник отдела медицинской информатики, радиомики и радиогеномики государственного бюджетного учреждения здравоохранения города Москвы «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы»; 127051, Москва, ул. Петровка, д. 24; e-mail: GatsukAS@zdrav.mos.ru.

Information about the authors:

Avet S. Azaryan — postgraduate student, Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Health Care Department, 24 Petrovka St., Moscow, 127051, Russia; assistant Professor at the Department of the Central State Medical Academy, Marshal Timoshenko St., 19, p. 1A, Moscow, 121359, Russia; e-mail: Dr.Azaryan@yandex.ru; ORCID 0009–0007–8975–0017;

Leo D. Pestrenin — junior Research Fellow, Department of Medical Informatics, Radiomics and Radiogenomics, Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Health Care Department, 24 Petrovka St., Moscow, 127051, Russia; e-mail: PestreninLD@zdrav.mos.ru; ORCID 0000–0002–1786–4329;

Margarita S. Khrustacheva — postgraduate student, Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Health Care Department, 24 Petrovka St., Moscow, 127051, Russia; e-mail: Myukhrustacheva@mail.ru; ORCID 0009–0001–1381–0809;

Yuriy A. Vasilev — Dr. of Sci. (Med.), Medical Director, Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Health Care Department, 24 Petrovka St., Moscow, 127051, Russia; e-mail: nprcmr@zdrav.mos.ru; ORCID 0000–0002–5283–5961;

Anton V. Vladzimirskiy — Dr. of Sci. (Med.), Deputy Director for R&D, Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Health Care Department, 24 Petrovka St., Moscow 127051, Russia; e-mail: VladzimirskijAV@zdrav.mos.ru; ORCID 0000–0002–2990–7736;

Olga V. Omelyanskaya — Chief Administrative Officer of R&D/CAO of R&D State Budget-Funded Health Care Institution of the City of Moscow «Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Health Care Department»; e-mail: OmelyanskayaOV@zdrav.mos.ru; ORCID 0000–0002–0245–4431;

Alla S. Domozhirova — Dr. of Sci. (Med.), Chair of the Scientific Problem Commission, Scientific Secretary State Budget-Funded Health Care Institution of the City of Moscow «Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Health Care Department»; ORCID 0000–0003–0806–3164;

Kirill M. Arzamasov — Dr. of Sci. (Med.), Head of Department of Medical Informatics, Radiomics, and Radiogenomics, Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Health Care Department, 24 Petrovka St., Moscow, 127051, Russia; e-mail: ArzamasovKM@zdrav.mos.ru; ORCID 0000–0001–7786–0349;

Anderei S. Gatsuk — junior Research Fellow, Department of Medical Informatics, Radiomics and Radiogenomics, Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Health Care Department, 24 Petrovka St., Moscow, 127051, Russia; e-mail: GatsukAS@zdrav.mos.ru.

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства, согласно международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распределен следующим образом: концепция и план исследования — Ю. А. Васильев, А. В. Владимирский, О. В. Омелянская, А. С. Доможирова; сбор и анализ данных — А. С. Азарян, М. Ю. Хрустачева, Л. Д. Пестренин; подготовка рукописи — А. С. Азарян, Л. Д. Пестренин, К. М. Арзамасов, А. С. Гацук.

Authors' contributions. All authors confirm their authorship according to the international ICMJE criteria (all authors made substantial contributions to the conception, research, and preparation of the article, and read and approved the final version before publication). Special contribution: YuAV, AVV, OVO, ASD aided in the concept and plan of the study; ASA, MYuKh, LDP provided collection and analysis of data; ASA, LDP, KMA, ASG preparation of the manuscript.

Потенциальный конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Disclosure: the author declares no conflict of interest.

Соответствие принципам этики: Исследование основано на результатах Эксперимента по использованию инновационных технологий в области компьютерного зрения для анализа медицинских изображений и дальнейшего применения в системе здравоохранения города Москвы, утвержденного этическим комитетом (выписка из протокола № 2 НЭК МРО РОПР от 20 февраля 2020 года), также зарегистрированного на ClinicalTrials (NCT04489992). Информированное согласие получено от каждого пациента.

Adherence to ethical standards: The study is based on the results of an Experiment on the use of innovative technologies in the field of computer vision for the analysis of medical images and further application in the healthcare system of the city of Moscow, approved by the Ethics Committee (extract from Protocol No. 2 of NEC MRO RORR dated February 20, 2020), also registered on ClinicalTrials (NCT04489992). Informed consent was obtained from each patient.

Финансирование: Данная статья подготовлена авторским коллективом в рамках НИР «Создание системы контроля качества автономного искусственного интеллекта», в соответствии с приказом от 27.11.2025 № 1213 Департамента здравоохранения города Москвы.

Funding: This paper was prepared by a group of authors as a part of the research and development effort titled «Development of a quality control system for autonomous artificial intelligence», in accordance with the Order No. 1213 dated November 27, 2025 issued by the Moscow Health Care Department.

Поступила/Received: 20.01.2026

Принята к печати/Accepted: 29.05.2026

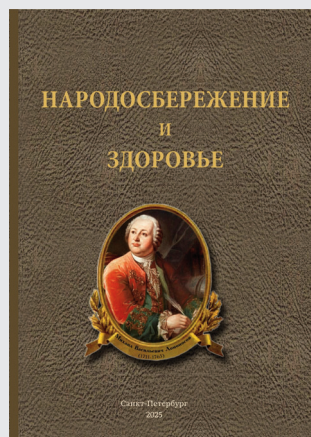
Опубликована/Published: 29.06.2026

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Bray F., Laversanne M., Sung H. et al. Global cancer statistics 2022: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries // *CA: A Cancer Journal for Clinicians*. 2024. Vol. 74, No. 3. P. 229–263. doi: 10.3322/caac.21834.
- Владимирский А.В., Васильев Ю.А., Шахов А.В. и др. Влияние технологий искусственного интеллекта на активную выявляемость рака молочной железы: эффективность и масштабирование // *Здравоохранение стран СНГ*. 2026. Т. 2, № 1. С. 11–19. [Vladymyrskyy A.V., Vasilev Yu.A., Shakhov A.V. et al. The impact of artificial intelligence technologies on active breast cancer detection: efficiency and scalability. *The CIS Healthcare*, 2026, Vol. 2, No. 1, pp. 11–19 (In Russ.)]. doi: 10.21045/3033-6341-2026-2-1-11-19.
- Мерабишвили В.М. Состояние онкологической помощи в России: рак молочной железы среди женского населения. Заболеваемость, смертность, достоверность учета, детальная локализационная и гистологическая структура. Популяционное исследование на уровне федерального округа // *Вопросы онкологии*. 2022. Т. 68, № 3. С. 286–293. [Merabishvili V.M. The state of oncological care in Russia: breast cancer among the female population. Morbidity, mortality, reliability of accounting, detailed localization and histological structure. Population-based research at the federal district level. *Issues of oncology*, 2022, Vol. 68, No. 3, pp. 286–293 (In Russ.)]. doi: 10.37469/0507-3758-2022-68-3-286-293.
- Ren W., Chen M., Qiao Y., Zhao F. Global guidelines for breast cancer screening: A systematic review // *Breast. Churchill Livingstone*. 2022. Vol. 64. P. 85–99. doi: 10.1016/j.breast.2022.04.003.
- Spak D.A., Plaxco J.S., Santiago L., Dryden M.J., Dogan B.E. BI-RADS® fifth edition: A summary of changes // *Diagnostic and Interventional Imaging*. 2017. Vol. 98, No. 3. P. 179–190. doi: 10.1016/j.diii.2017.01.001.
- Васильев Ю.А., Сон И.М., Пестренин Л.Д., Владимирский А.В. Результативность профилактической маммографии в Российской Федерации: сравнение итогов первого этапа диспансеризации в 2019 и 2022 гг. // *Менеджер здравоохранения*. 2024. Т. 11. С. 63–76. [Vasiliev Yu.A., Son I.M., Pestrenin L.D., Vladimyrskyy A.V. Effectiveness of preventive mammography in the Russian Federation: comparison of the results of the first stage of medical examination in 2019 and 2022. *Healthcare Manager*, 2024, Vol. 11, pp. 63–76 (In Russ.)]. doi: 10.21045/1811-0185-2024-11-63-76.
- Cai H., Wang J., Dan T. et al. An Online Mammography Database with Biopsy Confirmed Types // *Scientific Data*. 2023. Vol. 10. P. 123. doi: 10.1038/s41597-023-02025-1.
- Васильев Ю.А., Тыров И.А., Владимирский А.В. и др. Двойной просмотр результатов маммографии с применением технологий искусственного интеллекта: новая модель организации массовых профилактических исследований // *Digital Diagnostics*. 2023. Т. 4, № 2. С. 93–104. [Vasiliev Yu.A., Tyrov I.A., Vladimyrskyy A.V. et al. Double viewing of mammography results using artificial intelligence technologies: a new model for organizing mass preventive research. *Digital Diagnostics*, 2023, Vol. 4, No. 2, pp. 93–104 (In Russ.)]. doi: 10.17816/DD321423.
- Арзамасов К.М., Васильев Ю.А., Владимирский А.В. и др. Применение компьютерного зрения для профилактических исследований на примере маммографии // *Профилактическая медицина*. 2023. Т. 26, № 6. С. 117–123. [Arzamasov K.M., Vasiliev Yu.A., Vladimyrskyy A.V. et al. Application of computer vision for preventive examinations using mammography as an example. *Preventive Medicine*, 2023, Vol. 26, No. 6, pp. 117–123 (In Russ.)]. doi: 10.17116/profmed20232606117.
- Dang L.A., Chazard E., Poncelet E. et al. Impact of artificial intelligence in breast cancer screening with mammography // *Breast Cancer*. 2022. Vol. 29, No. 6. P. 967–977. doi: 10.1007/s12282-022-01375-9.
- Liu J., Lei J., Ou Y. et al. Mammography diagnosis of breast cancer screening through machine learning: a systematic review and meta-analysis // *Clin. Exp. Med*. 2022. Vol. 23, No. 6. P. 2341–2356. doi: 10.1007/s10238-022-00895-0.
- Le Boulc'h M., Bekhouche A., Kermarrec E. et al. Comparison of breast density assessment between human eye and automated software on digital and synthetic mammography: Impact on breast cancer risk // *Diagn. Interv. Imaging*. 2020. Vol. 101, No. 12. P. 811–819. doi: 10.1016/j.diii.2020.07.004.
- Ji H., Jang Mjin, Chang J.M. Variability in Breast Density Estimation and Its Impact on Breast Cancer Risk Assessment // *J. Breast Cancer*. 2024. Vol. 27, No. 5. P. 334–342. doi: 10.4048/jbc.2024.0101.
- Rigaud B., Weaver O.O., Dennison J.B. et al. Deep Learning Models for Automated Assessment of Breast Density Using Multiple Mammographic Image Types // *Cancers (Basel)*. 2022. Vol. 14, No. 20, P. 5003. doi: 10.3390/cancers14205003.
- Бобровская Т.М., Васильев Ю.А., Никитина Н.Ю. и др. Объем выборки для оценки диагностической точности программного обеспечения на основе технологий искусственного интеллекта в лучевой диагностике // *Сибирский журнал клинической и экспериментальной медицины*. 2024. Т. 39, № 3. С. 188–198. [Bobrovskaya T.M., Vasiliev Yu.A., Nikitina N.Yu. et al. Sample size for assessing the diagnostic accuracy of software based on artificial intelligence technologies in radiation diagnostics. *Siberian Journal of Clinical and Experimental Medicine*, 2024, Vol. 39, No. 3, pp. 188–198 (In Russ.)]. doi: 10.29001/2073-8552-2024-39-3-188-198.
- Tan H., Wu Q., Wu Y. et al. Mammography-based artificial intelligence for breast cancer detection, diagnosis, and BI-RADS categorization using multi-view and multi-level convolutional neural networks // *Insights Imaging*. 2025. Vol. 16, No. 1. P. 109. doi: 10.1186/s13244-025-01983-x.

17. Васильев Ю.А., Владимирский А.В., Арзамасов К.М. и др. Первые 10 000 маммографических исследований, выполненных в рамках услуги «описание и интерпретация данных маммографического исследования с использованием искусственного интеллекта» // *Менеджер здравоохранения*. 2023. № 8. С. 54–67. [Vasiliev Yu.A., Vladimirovsky A.V., Arzamasov K.M. et al. The first 10,000 mammographic examinations performed within the framework of the service «description and interpretation of mammographic examination data using artificial intelligence». *Healthcare Manager*, 2023, No. 8, pp. 54–67 (In Russ.)]. doi: 10.21045/1811-0185-2023-8-54-67.
18. Sasaki M., Tozaki M., Rodriguez-Ruiz A. et al. Artificial intelligence for breast cancer detection in mammography: experience of use of the ScreenPoint Medical Transpara system in 310 Japanese women // *Breast Cancer*. 2020. Vol. 27, No. 4. P. 642–651. doi: 10.1007/S12282-020-01061-8.
19. Arzamasov K., Vasilev Y., Vladymyrsky A. et al. An International Non-Inferiority Study for the Benchmarking of AI for Routine Radiology Cases: Chest X-ray, Fluorography and Mammography // *Healthcare*. 2023. Vol. 11, No. 12. P. 1684. doi: 10.3390/healthcare11121684.
20. Li H.Y., Lin Y., Hong Y.T., Chou C.P. Comparative Study of Artificial Intelligence-based System Alone in Synthesized Mammography Versus Radiologist's Interpretation of Digital Breast Tomosynthesis in Screening Women // *Journal of Radiological Science*. 2024. Vol. 49. No. 1. P. 59–65. doi: 10.4103/jradiosci.JRAD-2023-00027.
21. Caldas F.A.A., Caldas H.C., Henrique T. et al. Evaluating the performance of artificial intelligence and radiologists accuracy in breast cancer detection in screening mammography across breast densities // *European Journal of Radiology Artificial Intelligence*. 2025. Vol. 2. P. 100013. doi: 10.1016/j.ejrai.2025.100013.
22. Азарян А.С., Пестренин Л.Д., Васильев Ю.А., Ахмад Е.С., Арзамасов К.М. Согласованность между рентгенологами города Москвы при интерпретации маммографических исследований по шкале BI-RADS // *Альманах клинической медицины*. 2024. Т. 52, № 7. С. 377–384. [Azaryan A.S., Pestrenin L.D., Vasiliev Yu.A., Akhmad E.S., Arzamasov K.M. Agreement between Moscow radiologists in the interpretation of mammographic studies using the BI-RADS scale. *Almanac of Clinical Medicine*, 2024, Vol. 52, No. 7, pp. 377–384 (In Russ.)]. doi: 10.18786/2072-0505-2024-52-035.
23. Taya M. Comparative Performance of Artificial Intelligence Algorithms for Screening Mammography. *Radiol. Imaging Cancer*. 2020. Vol. 2, No. 6. P. e209034. doi: 10.1148/rycan.2020209034.
24. Renard X., Laugel T., Detyniecki M. Understanding Prediction Discrepancies in classification // *Machine Learning*. 2024. Vol. 113, No. 3. P. 7997–8026. doi: 10.1007/s10994-024-06557-4.
25. Han T., Yun H., Sur Y.K., Park H. Optimizing Artificial Intelligence Thresholds for Mammographic Lesion Detection: A Retrospective Study on Diagnostic Performance and Radiologist-Artificial Intelligence Discordance // *Diagnostics*. 2025. Vol. 15, No. 11. P. 1368. doi: 10.3390/diagnostics15111368
26. Chen Y., Partridge G.J.W., Vazirabad M. et al. Performance of Algorithms Submitted in the 2023 RSNA Screening Mammography Breast Cancer Detection AI Challenge // *Radiology*. 2025. Vol. 316, No. 2. P. e241447. doi: 10.1148/radiol.241447.

Уважаемые коллеги!



В монографии, подготовленной в виде научных очерков, представлены наиболее значимые события становления в России направления народосбережения и охраны здоровья. Исторические события изложены в сочетании следующих важных факторов — демографии и народонаселения, прироста и потерь населения, длительности жизни, заболеваний, влияющих на численность населения, и других факторов. Рассмотрены основные критерии оценки народосбережения: количественные (рождаемость, численность, заболеваемость, потери и др.) и качественные (удовлетворенность и качество жизни, коэффициент счастья, географические и материальные влияния и др.). Описаны психологические и социальные причины воздействия на рождаемость и смертность от разных причин и др. В подготовке книги участвовали ведущие специалисты — представители различных отраслей науки: врачи, эпидемиологи, психологи, биологи и демографы и др. Книга по содержанию и изложению носит междисциплинарный характер, что расширяет круг заинтересованных читателей. Изложенные материалы могут быть интересны и познавательны для специалистов, работающих в сфере народосбережения, ученых, преподавателей, студентов университетов и иных читателей.

Подробная информация о книге
на сайте издательства <https://www.bmosc-spb.ru>.

РАДИОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ В ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ ТКАНЕЙ НАДОСТНОЙ МЫШЦЫ ПРИ МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНОЙ ТОМОГРАФИИ: РЕТРОСПЕКТИВНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

¹А. А. Жиликов[✉], ²В. С. Блинов[✉], ³П. Ф. Чернавин[✉], ¹А. В. Жиликов^{✉*}

¹Уральский государственный медицинский университет, Екатеринбург, Россия

²Верхнепышминская центральная городская клиническая больница имени П. Д. Бородина, Верхняя Пышма, Россия

³Уральский федеральный университет имени Первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

ВВЕДЕНИЕ: Радиомика рассматривается как инструмент объективного количественного анализа медицинских изображений, позволяющий описывать тканевые изменения через набор воспроизводимых числовых дескрипторов. Для поражений вращательной манжеты плеча наиболее проблемным остается воспроизводимое распознавание промежуточных степеней жировой инфильтрации и атрофии надостной мышцы по данным МРТ, поскольку традиционные визуальные шкалы подвержены субъективизму и дают неоднозначные границы между соседними стадиями. В связи с этим актуальна разработка радиомико-ориентированного протокола на протонно-взвешенных последовательностях с подавлением жира как на наиболее распространенном клиническом источнике данных.

ЦЕЛЬ: Определить наиболее информативные радиомические, преимущественно текстурные, параметры на протонно-взвешенных МРТ-изображениях надостной мышцы и на их основе разработать и внутренне валидировать классификационную модель машинного обучения (Random Forest) для объективной многоклассовой стратификации выраженности дегенеративных изменений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ: Проведен ретроспективный анализ 41 МРТ плечевого сустава, выполненных на томографах 1,5 Тл в клиниках Екатеринбурга и Свердловской области. Использовали протонно-взвешенные серии семейства TSE/FSE с подавлением жира (PD-FS) стандартного клинического протокола; изображения подвергали унифицированной предобработке и стандартизации. Надостную мышцу сегментировали посрезово с формированием трехмерной области интереса, после чего извлекали радиомические дескрипторы (SlicerRadiomics). Исходный набор включал 427 параметров; применяли поэтапное сокращение размерности (удаление неинформативных переменных, корреляционная фильтрация, комбинированный отбор предикторов) с формированием финального набора для моделирования. В качестве основного классификатора использовали Random Forest с балансировкой классов и подбором гиперпараметров; качество оценивали 5-кратной стратифицированной кросс-валидацией. Дополнительно анализировали покласовую чувствительность, тасго F1-score, κ и AUC в схеме «один против всех».

Статистика: статистическая обработка данных и построение моделей машинного обучения осуществлялись с использованием программного обеспечения IBM SPSS Statistics (IBM Corp., Армонк, США) и среды статистических вычислений R (R Core Team, 2025), а также с применением языка программирования Python (библиотеки scikit-learn, pandas, matplotlib, shap).

РЕЗУЛЬТАТЫ: По экспертной оценке, распределение степеней дегенеративных изменений составило: степень 0 — 11 случаев (26,8%), степень 1 — 5 (12,2%), степень 2 — 20 (48,8%), степень 3 — 5 (12,2%). После предобработки и отбора сформирован финальный набор из 43 радиомических предикторов. Внутренняя валидация модели Random Forest показала общую точность 63,4%, тасго F1-score 45,7% и $\kappa=0,42$. ROC-анализ в схеме «один против всех» продемонстрировал высокие значения AUC (0,94–1,0) при выраженной неоднородности качества между классами: модель надежнее распознавала наиболее представленную категорию, тогда как промежуточные/малочисленные степени требовали дальнейшего улучшения протокола и расширения выборки. Наибольший вклад в решения модели вносили текстурные параметры после вейвлет-преобразования и показатели, отражающие интегральные особенности интенсивности сигнала в области интереса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ: Показана принципиальная реализуемость радиомико-ориентированной многоклассовой классификации дегенеративных изменений надостной мышцы на протонно-взвешенных МР-изображениях в условиях реальной клинической выборки. Полученные результаты подтверждают высокую информативность текстурных признаков, однако выявляют ограничение текущей модели при дифференциации соседних и малочисленных степеней, что требует дальнейшей гармонизации протокола и расширения данных.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: радиомика, надостная мышца, плечевой сустав, магнитно-резонансная томография, машинное обучение

* Для корреспонденции: Жиликов Андрей Викторович, e-mail: doctor-zhilyakov@rambler.ru

Для цитирования: Жилияков А.А., Блинов В.С., Чернавин П.Ф., Жилияков А.В. Радиомический анализ в оценке состояния тканей надостной мышцы при магнитно-резонансной томографии: ретроспективное исследование // *Лучевая диагностика и терапия*. 2026. Т. 17, № 2. С. 98–109, doi: <http://doi.org/10.22328/2079-5343-2026-17-2-98-109>.

RADIOMIC ANALYSIS IN THE ASSESSMENT OF SUPRASPINATUS MUSCLE TISSUE STATUS ON MAGNETIC RESONANCE IMAGING: A RETROSPECTIVE STUDY

¹Alexander A. Zhilyakov^{ORCID}, ²Vladislav S. Blinov^{ORCID}, ³Pavel F. Chernavin^{ORCID}, ¹Andrey V. Zhilyakov^{ORCID}*

¹Ural State Medical University, Yekaterinburg, Russia

²Verkhnepyshminskaya Central City Clinical Hospital named after P. D. Borodin, Verkhnyaya Pyshma, Russia

³Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

INTRODUCTION: Radiomics provides quantitative image-derived descriptors that may reduce subjectivity in MRI assessment of supraspinatus muscle degeneration. In rotator cuff pathology, the major challenge is reliable stratification of intermediate grades of fatty infiltration and atrophy, where visual grading is prone to inter-reader variability. Proton-density fat-suppressed sequences are routinely acquired in shoulder MRI and may serve as a practical source for radiomics-based modeling.

OBJECTIVE: To identify the most informative radiomic, predominantly texture-based, features on proton-density fat-suppressed MRI of the supraspinatus muscle and, based on these features, to develop and internally validate a Random Forest machine-learning model for objective multiclass stratification of degenerative changes.

MATERIALS AND METHODS: A retrospective dataset of 41 shoulder MRI examinations acquired on 1.5 T scanners in multiple clinical sites was analyzed. PD-weighted turbo/fast spin-echo fat-suppressed series were selected and processed using a unified pre-processing and standardization workflow. The supraspinatus muscle was manually segmented slice-by-slice to create a three-dimensional region of interest. Radiomic features were extracted using SlicerRadiomics, followed by stepwise dimensionality reduction and a combined feature-selection strategy to form the final predictor set. A Random Forest classifier with class balancing and hyperparameter tuning was used as the main model. Performance was assessed with 5-fold stratified cross-validation using accuracy, macro F1-score, Cohen's kappa, per-class sensitivity, and one-vs-rest ROC AUC.

Statistics: statistical data processing and the construction of machine learning models were carried out using IBM SPSS Statistics software (IBM Corp., Armonk, USA) and the R statistical computing environment (R Core Team, 2025), as well as using the Python programming language (scikit-learn, pandas, matplotlib, shap libraries).

RESULTS: Expert grading yielded an imbalanced class distribution (grade 0: 11 cases; grade 1: 5; grade 2: 20; grade 3: 5). The final modeling set comprised 43 radiomic predictors. Cross-validated performance of the Random Forest model reached an overall accuracy of 63.4%, macro F1-score of 45.7%, and Cohen's kappa of 0.42. One-vs-rest ROC analysis showed high AUC values (0.94–1.0), while class-wise sensitivity indicated pronounced heterogeneity, with better recognition of the most prevalent category and reduced performance for intermediate/rare grades. Wavelet-based texture features and intensity-related descriptors contributed most to model decisions.

CONCLUSIONS: The study demonstrates the feasibility of radiomics-assisted multiclass classification of supraspinatus muscle degeneration on PD fat-suppressed MRI in a real-world clinical dataset. Texture features, particularly wavelet-derived metrics, were among the most informative; however, discrimination of adjacent and underrepresented grades remains a limitation and requires further protocol harmonization and larger datasets.

KEYWORDS: radiomics, supraspinatus muscle, shoulder joint, magnetic resonance imaging, machine learning

* For correspondence: Andrey V. Zhilyakov, e-mail: doctor-zhilyakov@rambler.ru

For citation: Zhilyakov A.A., Blinov V.S., Chernavin P.F., Zhilyakov A.V. Radiomic analysis in the assessment of supraspinatus muscle tissue status on magnetic resonance imaging: a retrospective study // *Diagnostic radiology and radiotherapy*. 2026. Vol. 17, No. 2. P. 98–109, <http://doi.org/10.22328/2079-5343-2026-17-2-98-109>.

Введение. Патология вращательной манжеты плеча, в частности поражение и дегенеративные изменения надостной мышцы, занимает ведущее место среди причин боли и нарушения функции плечевого сустава, значительно снижая качество жизни пациентов. Надостная мышца является центральным элементом в механизме отведения плеча и обеспечивает стабилизацию головки плечевой кости в гленоидальной впадине лопатки. Для ком-

плексной оценки дегенеративных изменений вращательной манжеты плеча специалисты применяют целый арсенал методик, основанных преимущественно на данных магнитно-резонансной томографии (МРТ) [1–3]. Визуальная качественная оценка надостной мышцы включает такие признаки, как тангенциальный знак (Tangent Sign), описанный Zanetti и соавт. в 1998 г., классификацию жировой инфильтрации по Goutallier (1994), систему стадирования

атрофии по Warner (2001), а также оценку степени ретракции ее сухожилия по Patte [1, 4].

Количественный анализ, обеспечивающий объективные численные данные, опирается на такие параметры, как Occupation Ratio (отношение площади мышцы к площади ее костной ямки), предложенный Thomazeau и соавт. в 1996 г., и более современные подходы, включая трехмерный волюметрический анализ мышечных объемов [1, 2, 4].

Несмотря на доказанную клиническую значимость, все перечисленные подходы имеют существенные ограничения, включая выраженный субъективизм и низкую межэкспертную воспроизводимость, что особенно ярко проявляется при анализе промежуточных стадий патологии [5–7].

Перспективным решением для преодоления указанных ограничений является применение радиомики — методики объективного количественного машинного анализа изображений с извлечением радиомических (радиомных) дескрипторов [8]. Интеграция радиомики с методами искусственного интеллекта (ИИ) уже продемонстрировала высокий потенциал для автоматизированной оценки состояния надостной мышцы по данным МРТ [5, 6, 9, 10]. Вместе с тем в большинстве таких работ в качестве базовой последовательности использовались T1-взвешенные изображения, которые оптимальны для характеристики жировой инфильтрации и атрофии, но обладают ограниченной чувствительностью к внутримышечному отеку, воспалительным изменениям и реактивным изменениям мягких тканей, особенно при оценке ранних или смешанных стадий повреждения вращательной манжеты плеча. Методологические обзоры указывают, что диагностическая полезность радиомики в значительной степени определяется выбором параметров предобработки и дискретизации, а также тем, какие классы дескрипторов рассматриваются как приоритетные для клинических задач; поэтому протокол извлечения признаков должен быть детализирован и воспроизводим [11].

С практической точки зрения более рациональным источником данных для построения радиомических и ИИ-моделей являются протонно-взвешенные последовательности, поскольку они также входят в обязательный стандартный протокол МРТ плечевого сустава, обеспечивают высокое пространственное и контрастное разрешение структур мягких тканей и костных элементов и тем самым создают более универсальную основу для комплексной оценки морфологии [12–14].

Несмотря на общий прогресс, последние обзорные статьи указывают на наличие ряда проблем, таких как недостаточная стандартизация методик и ограниченность наборов данных [15, 16]. Аналогичные методологические акценты — необходимость протокольной унификации этапов предобработки, дискретизации уровней серого и контроля качества радиомических дескрипторов — отражены

и в отечественных публикациях по радиомике [11, 17]. Ключевой, нерешенной задачей остается отсутствие валидированных радиомических признаков и адаптированных шкал оценки, разработанных именно для протонно-взвешенных изображений. Сложившаяся методологическая неопределенность диктует необходимость проведения исследования, направленного на поиск и валидацию информативного набора радиомических признаков на PD-последовательностях с последующей разработкой на их основе объективной классификационной модели.

Отдельное значение для клинической применимости радиомики имеет контур контроля качества, включающий проверку корректности сегментации, стабильности предобработки и воспроизводимости извлекаемых дескрипторов при вариациях исходных данных. В отечественных работах подчеркивается, что без формализованного QC-подхода радиомические признаки могут отражать особенности протокола и аппаратуры, а не состояние ткани [17].

Цель. Определить наиболее информативные радиомические, преимущественно текстурные, параметры на протонно-взвешенных МРТ-изображениях надостной мышцы и на их основе разработать и внутренне валидировать классификационную модель машинного обучения (Random Forest) для объективной многоклассовой стратификации выраженности дегенеративных изменений.

Задачи исследования:

1. Сформировать ретроспективную мультицентровую выборку МРТ плечевого сустава (1,5 Тл) и стандартизировать исходные данные (деперсонализация, критерии включения/исключения, выбор сопоставимых PD-FS серий).

2. Выбрать целевую переменную путем слепой независимой экспертной оценки надостной мышцы двумя врачами-рентгенологами с последующим консенсусом и классификацией по 4-балльной порядковой шкале.

3. Выполнить сегментацию надостной мышцы с построением трехмерной области интереса и реализовать унифицированный протокол предобработки изображений, включая передискретизацию к изотропному вокселю.

4. Извлечь радиомические дескрипторы из сегментированных объемов и сформировать матрицу количественных признаков.

5. Провести поэтапное сокращение размерности (удаление неинформативных параметров, корреляционная фильтрация, комбинированный отбор предикторов) для формирования финального набора признаков для моделирования.

6. Построить и внутренне валидировать модель Random Forest методом 5-кратной стратифицированной кросс-валидации с оценкой качества по ассигасу, макро F1-score, κ , поклассовой чувствительности и AUC, а также интерпретировать вклад ключевых предикторов.

Материалы и методы. Ретроспективный характер исследования определял использование архивных МРТ-данных без дополнительного вмешательства в лечебно-диагностический процесс. Протокол исследования был рассмотрен локальным этическим комитетом и признан не требующим индивидуально-информированного согласия ввиду ретроспективного анализа деперсонализированных данных (решение ЛЭК УГМУ № 3 от 18.04.25). Все исследования перед включением в анализ были деперсонализированы: удалялись персональные идентификаторы из DICOM-заголовков и любых сопроводительных файлов, каждому случаю присваивался код, а доступ к ключу сопоставления имели только ответственные исследователи; анализ выполнялся на обезличенном наборе без клинических персональных данных.

В исследование включена 41 МРТ плечевого сустава, выполненная на томографах с напряженностью магнитного поля 1,5 Тл в клиниках Екатеринбурга и Свердловской области. Критериями включения являлись наличие МРТ плечевого сустава, выполненной на томографе 1,5 Тл, и наличие протонно-взвешенной серии TSE/FSE с подавлением жира (PD-FS) в стандартной клинической ориентации, пригодной для сегментации и последующего радиомического анализа. Критериями исключения служили выраженные артефакты движения, технические дефекты изображения, отсутствие требуемой серии, а также случаи с неполной визуализацией надостной мышцы, не позволяющей сформировать корректную область интереса.

Для обеспечения сопоставимости данных анализ проводился только по унифицированному типу исходных изображений — протонно-взвешенным сериям TSE/FSE с подавлением жира (PD-FS), полученным в рамках стандартного клинического протокола 1,5 Тл. Геометрия включенных серий была близкой: толщина среза составляла 3,0 мм, а пространственное разрешение в плоскости изображения находилось в узком диапазоне (медиана 0,332 мм/пиксель; межквартильный размах 0,313–0,332 мм/пиксель). Для снижения влияния возможных межпротокольных различий изображения перед извлечением признаков стандартизировали путем передискретизации до изотропного размера вокселя $1 \times 1 \times 1$ мм; влияние геометрических параметров на ключевые радиомические признаки дополнительно учитывали при последующем статистическом анализе.

Обработка изображений выполнялась в 3D Slicer (v5.6.2) с импортом DICOM-серий PD-FS и предварительной проверкой корректности ориентации и качества изображения. Сегментацию надостной мышцы проводили в сагиттальной плоскости методом ручного посрезового оконтуривания с формированием трехмерной маски в модуле Segment Editor. Для снижения вариативности границ использовали единый подход к визуализации (стабильные настройки окна/уровня или эквивалентный режим с минимальной ручной кор-

рекцией), чтобы сохранить сопоставимый контраст «мышца–жир» между исследованиями. Детализация параметров стандартизации и извлечения признаков приведена исходя из общепринятого подхода к повышению воспроизводимости радиомики, где критическое значение придается фиксированным правилам дискретизации и унификации этапов предобработки [11].

Контур проводили по фасциальным границам, включая весь визуализируемый мышечный объем; внутримышечные участки жировой инфильтрации не исключали, поскольку они являются частью анатомического объема и представляют интерес для радиомики. Из области интереса последовательно исключали кость, бурсу, суставной выпот и иные структуры, способные исказить текстурные признаки. Зону сухожилия надостной мышцы, включая внутримышечную сухожильную часть и сухожильные волокна у места прикрепления, из ROI исключали, чтобы анализ отражал характеристики мышечного брюшка. Корректность границ контролировали на соседних срезах и дополнительно проверяли в ортогональных плоскостях, предотвращая «утечки» маски и эффект частичного объема.

После разметки выполняли минимальную постобработку сегмента: допускалось мягкое сглаживание без изменения топологии и объема, агрессивные морфологические операции (расширение/эрозия) не применяли. Каждый сегмент проверяли на непрерывность и отсутствие изолированных фрагментов вне мышцы, после чего маски сохраняли с привязкой к серии и метаданным исследования для обеспечения воспроизводимости. Модуль MONAI Label (v0.8.5) использовали для организации рабочего процесса и унификации этапов разметки в рамках единого протокола.

Из полученных сегментированных объемов радиомические признаки извлекались с помощью модуля SlicerRadiomics (v1.0.0). Рассчитывали признаки первого порядка, отражающие распределение интенсивностей вокселей; признаки формы, описывающие трехмерную геометрию сегментированного объема; а также текстурные признаки, характеризующие пространственные взаимосвязи между вокселями и неоднородность ткани, включая показатели на основе матриц GLCM, GLRLM, GLSZM, NGTDM и GLDM. Для повышения чувствительности к латентным текстурным паттернам извлечение признаков выполняли не только на исходных изображениях, но и на их фильтрованных представлениях: применяли дискретное вейвлет-преобразование с декомпозицией на восемь частотных субдиапазонов и фильтр Laplacian of Gaussian с $\sigma=3$ мм для усиления структур заданного масштаба.

Итоговый массив признаков экспортировали в формат CSV для дальнейшего анализа. Все признаки стандартизировали методом z-преобразования (z-score), после чего из набора исключали предикторы с нулевой или околонулевой дисперсией.

Пропущенные значения в данных отсутствовали, поэтому процедуры импутации не применялись.

Для формирования целевой переменной, необходимой для обучения и последующей внутренней валидации моделей, была выполнена экспертная визуальная оценка состояния надостной мышцы на МРТ. Оценку проводили два независимых врача-рентгенолога с опытом работы в мышечно-скелетной радиологии более 5 лет в слепом режиме, без доступа к клиническим данным и результатам радиомического анализа.

Классификация осуществлялась по краткой 4-балльной порядковой шкале, разработанной для целей данного исследования и ориентированной на два наиболее клинически значимых морфологических компонента, обсуждаемых в литературе и применяемых в рутинной практике при анализе МРТ вращательной манжеты: степень атрофии мышечного брюшка и выраженность жировой инфильтрации. Уровень 0 соответствовал сохраненному мышечному объему без признаков жировой инфильтрации; уровень 1 — минимальным признакам атрофии с единичными очагами жировых включений; уровень 2 — умеренной жировой инфильтрации до 50% объема мышечного брюшка; уровень 3 — выраженному жировому замещению более 50% объема мышцы. При расхождении первичных оценок проводилась регистрация разногласия с последующим обсуждением для достижения консенсуса; итоговый консенсусный класс использовали как целевую метку в моделировании.

После формирования целевой переменной выполняли сокращение размерности пространства предикторов с целью уменьшения мультиколлинеарности и предотвращения переобучения моделей. На первом этапе проводили корреляционную фильтрацию с расчетом коэффициентов Пирсона и Спирмена для всех пар переменных. При высокой взаимной зависимости ($|r| > 0,90$) в каждой коррелирующей группе сохраняли один представитель, а остальные признаки исключали, что позволяло уменьшить исходный набор без существенной потери информации. Полученный перечень параметров далее использовали как пул кандидатов для последующего отбора наиболее информативных характеристик в рамках построения модели.

На следующем этапе для уточнения структуры признаков, наиболее релевантных целевой переменной (степени дегенерации мышцы), применялась комбинация трех алгоритмических методов отбора. Первый подход основывался на расчете корреляции каждого признака с целевой переменной, в результате которого были отобраны признаки с абсолютным значением коэффициента $\geq 0,61$. Второй метод представлял собой логистическую регрессию с L1-регуляризацией (LASSO), позволяющую автоматически исключать параметры с нулевыми весами в модели. В качестве третьего подхода использовалось рекурсивное исключение признаков (Recursive Feature Elimination, RFE)

с логистической регрессией в качестве базового алгоритма. По завершении каждого метода формировались подмножества признаков, а финальный набор был составлен путем объединения всех переменных, отобранных хотя бы одним из алгоритмов.

В качестве основной модели для многоклассовой классификации использовали Random Forest (ансамбль из 100 деревьев решений) с учетом дисбаланса классов посредством автоматической балансировки весов классов. Подбор гиперпараметров выполняли методом сеточного поиска GridSearchCV, ограничивая пространство поиска параметрами, влияющими на сложность деревьев и устойчивость ансамбля, чтобы предотвратить переобучение на малой выборке. Оценку производительности проводили методом пятикратной стратифицированной кросс-валидации (StratifiedKFold, $k=5$), обеспечивающим сопоставимое представительство классов в каждом разбиении. Во избежание утечки данных все операции предобработки, включая стандартизацию (z-преобразование), а также процедуры отбора переменных и подбор гиперпараметров, выполняли исключительно на обучающей части соответствующего фолда с последующим применением полученных преобразований к отложенной тестовой части данного фолда; итоговые показатели рассчитывали на совокупности предсказаний, полученных на отложенных данных всех фолдов.

На каждом фолде формировали матрицу ошибок (confusion matrix) и агрегировали матрицы путем суммирования по всем пяти разбиениям, что позволяло вычислять метрики на объединенном наборе независимых предсказаний без смещения из-за неодинаковых размеров классов в отдельных фолдах. Для количественной оценки качества использовали общую точность (ассигасу), коэффициент каппа Коэна (κ) как меру согласия предсказаний модели с экспертной разметкой сверх случайного уровня и mean F1-score как усредненную по классам характеристику качества, менее чувствительную к дисбалансу по сравнению с ассигасу. Дополнительно рассчитывали чувствительность по каждому классу как долю верно распознанных наблюдений данного класса относительно всех истинных наблюдений этого класса, что позволяло выявлять неоднородность качества между степенями дегенеративных изменений.

С учетом выраженной несбалансированности выборки выполняли ROC-анализ в схеме «один против всех» с расчетом AUC для каждой категории на основе вероятностных прогнозов Random Forest. Поскольку AUC является порогонезависимой метрикой и может демонстрировать высокие значения даже при снижении качества на малочисленных классах, интерпретацию AUC проводили совместно с mean F1-score, κ и поклассовыми значениями чувствительности, рассматривая их как взаимодополняющие показатели клинической применимости модели.

На рис. 1 представлен дизайн исследования.

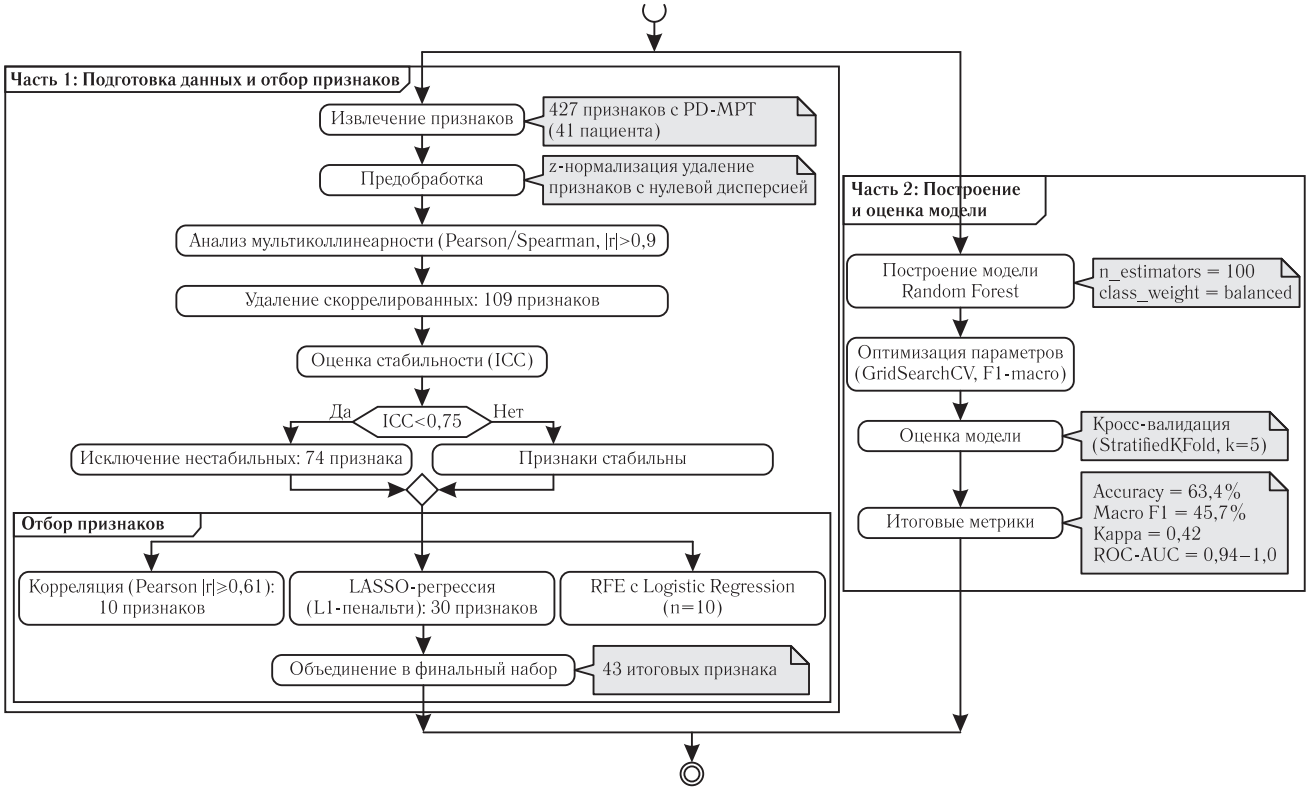


Рис. 1. Дизайн исследования
Fig. 1. Study design

Методика статистической обработки данных исследования

Статистическая обработка данных и построение моделей машинного обучения осуществлялись с использованием программного обеспечения IBM SPSS Statistics (IBM Corp., Армонк, США) и среды статистических вычислений R (R Core Team, 2025), а также с применением языка программирования Python (библиотеки scikit-learn, pandas, matplotlib, shap).

Результаты. Состояние надостной мышцы было экспертно оценено в 41 МРТ-исследовании плечевого сустава. Степень 0 выявлена у 11 пациентов (26,8%), степень 1 — у 5 (12,2%), степень 2 — у 20 (48,8%), степень 3 — у 5 (12,2%). Таким образом, распределение классов характеризовалось выраженным дисбалансом за счет преобладания степени 2.

На этапе радиомического извлечения в модуле SlicerRadiomics (v1.0.0) для каждого наблюдения сформирован исходный массив из 427 количественных параметров. Пропущенные значения в данных отсутствовали. Все переменные были стандартизированы методом z-преобразования. Удаление показателей с нулевой дисперсией и параметров, не вносящих вклада в обучение, привело к сокращению массива до 109 переменных.

Для уменьшения мультиколлинеарности выполнена корреляционная фильтрация внутри набора из 109 переменных. Пары с высокой взаимной зависимостью ($|r| > 0,90$) рассматривались как избыточные; из каждой коррелирующей группы сохранялся

один представитель, после чего размерность набора уменьшилась до 74 переменных.

Для первичной оценки различимости классов по отдельным параметрам выполнен однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) с расчетом F-критерия относительно целевой порядковой шкалы степени дегенеративных изменений. По значениям F были ранжированы наиболее выраженно различающие классы характеристики; в качестве примеров с максимальными значениями F выделены wavelet-HLH_firstorder_InterquartileRange (F=16,15), wavelet-HHH_firstorder_InterquartileRange (F=15,82) и diagnostics_Image-interpolated_Mean (F=13,75). Визуализация распределений пяти параметров с наибольшими значениями F представлена на рис. 2 и демонстрирует упорядоченное смещение медианных значений между степенями при ограниченном перекрытии межквартильных интервалов у части характеристик, что подтверждает их потенциал как дискриминирующих маркеров в рамках текущей выборки.

Как показано на рис. 2, для выбранных параметров наблюдается упорядоченное смещение медианных значений между степенями с ограниченным перекрытием межквартильных интервалов для части соседних категорий. Такая картина отражает одномерную различимость классов по данным переменным и подтверждает их потенциал как дискриминирующих маркеров в рамках текущей выборки. Следует подчеркнуть, что ANOVA и графическая визуализация распределений использовались на данном этапе как

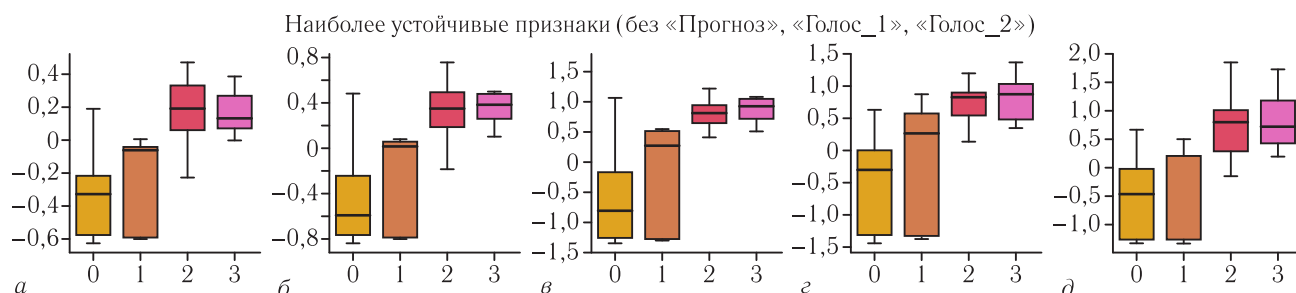


Рис. 2. Диаграммы распределения значений пяти параметров с наибольшими значениями F-критерия (ANOVA) в зависимости от степени жировых изменений в надостной мышце: *а* — wavelet-HLH_firstorder_InterquartileRange; *б* — wavelet-HHH_firstorder_InterquartileRange; *в* — wavelet-HLL_firstorder_InterquartileRange; *г* — diagnostics_Image-interpolated_Mean; *д* — diagnostics_Mask-interpolated_Maximum

средство интерпретации и первичного ранжирования отдельных параметров, тогда как формирование итогового набора переменных для обучения модели выполнялось многофакторно с применением комбинированного отбора (корреляционный отбор, LASSO и RFE) на пуле после корреляционной фильтрации; именно объединенный список из 43 предикторов использовали на этапе построения и валидации Random Forest.

Исходный набор данных для каждого наблюдения включал 427 количественных радиомических признаков, характеризующих широкий спектр свойств мышечной ткани. С целью построения робастной и интерпретируемой модели, а также для минимизации риска переобучения применен комбинированный подход, включающий три независимых статистических метода, что позволило выявить наиболее значимые предикторы.

Для формирования компактного набора предикторов, пригодного для построения интерпретируемой модели при малом объеме выборки, был применен комбинированный подход отбора с использованием трех независимых процедур. На первом шаге оценивали линейную связь с целевой переменной и при пороговом значении коэффициента корреляции Пирсона $r \geq 0,61$ выделили 13 кандидатов, включая wavelet-HLL_glm_Correlation и log-sigma-3-0-mm-3D_glm_Contrast. На втором шаге выполняли LASSO-регрессию с $\text{penalty}='l1'$ и $\text{solver}='saga'$, что привело к выделению 33 параметров с ненулевыми коэффициентами. На третьем шаге применяли рекурсивное исключение (RFE) на базе логистической регрессии, получив оптимальный по внутренней оценке набор из 10 параметров. Итоговый список формировали как объединение уникальных переменных, отобранных хотя бы одним из трех методов, что позволило сократить исходное пространство более чем в 10 раз и получить финальный набор из 43 предикторов. Пересечение результатов трех процедур отбора представлено на рис. 3.

Для построения классификационной модели использовали алгоритм Random Forest (ансамбль из 100 деревьев решений) с автоматической балансировкой классов. Подбор ключевых гиперпараметров (включая глубину деревьев и количество листьев) выполняли методом GridSearchCV. Диагностическую эффективность оценивали при 5-кратной стратифицированной кросс-валидации, обеспечивающей представительство классов в каждом разбиении. Итоговая

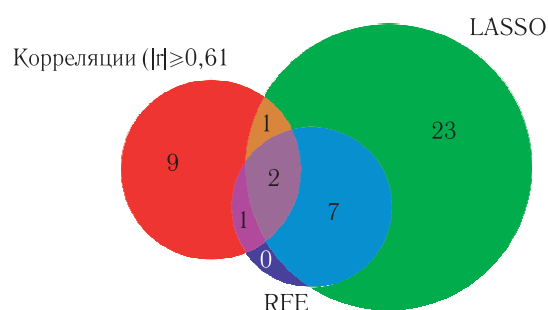


Рис. 3. Диаграмма Венна трех методов отбора
Fig. 3. Venn diagram of three selection methods

общая точность составила 63,4%, макро F1-score — 45,7%, коэффициент каппа Коэна $\kappa=0,42$, что соответствует умеренному уровню согласия между предсказаниями модели и экспертной разметкой. Анализ кривых ROC в режиме «один против всех» показал высокие значения AUC, варьировавшие от 0,94 до 1,0 для отдельных категорий; интерпретация данного результата выполнялась с учетом дисбаланса классов и особенностей многоклассовой постановки. Матрица ошибок классификации, полученная по итогам кросс-валидации, приведена на рис. 4.

Дополнительно проведен анализ качества по классам, который показал выраженную неоднородность: модель демонстрировала высокую чувствительность для наиболее представленной категории (степень 2; $\text{Se}=0,9$), тогда как для промежуточных/редких категорий степень 1 и степень 3 чувствительность оставалась низкой ($\text{Se}=0,0$ для обеих категорий), что отра-

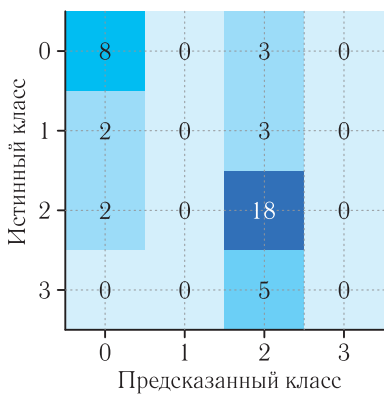


Рис. 4. Матрица ошибок классификации
Fig. 4. Confusion matrix

жает практическое ограничение текущей конфигурации при стратификации по всем четырем уровням. Интерпретация внутренней структуры модели выполнена на основе важности предикторов и SHAP-оценок. Наибольший средневзвешенный вклад в решение модели (22% суммарной информативности) вносил diagnostics_Image-interpolated_Mean. Две текстурные характеристики, сформированные после вейвлет-преобразования, суммарно обеспечили 31% вклада. Параметр wavelet-HLL_glcм_ClusterProminence характеризовался положительной SHAP-оценкой (+0,42) при переходе к более выраженным измене-

радиомических признаков, извлеченных из протонно-взвешенных МРТ-изображений надостной мышцы, при оценке степени выраженности дегенеративных изменений.

Предложенная в настоящем исследовании 4-балльная порядковая шкала не противопоставляется общепринятым методам оценки состояния надостной мышцы, а представляет их адаптированную интеграцию, ориентированную на задачи машинного обучения и радиомического анализа на протонно-взвешенных изображениях. Она опирается на те же морфологические конструкторы, которые лежат в основе клинической МР-интерпретации: выраженность атрофии мышечного брюшка и степень жировой дегенерации. В частности, тангенциальный знак и стадирование по Warner концептуально описывают атрофический компонент, тогда как классификация Goutallier отражает жировую инфильтрацию; в используемой нами градации эти два измерения сведены в единый уровень выраженности, что обеспечивает согласованную оценку «размера» и «качества» ткани в формате одной порядковой целевой переменной, пригодной для обучения классификационных моделей и сопоставления с радиомическими признаками. Оценка Patte, характеризующая ретракцию сухожилия, в шкалу намеренно не включалась, поскольку относится к анатомо-

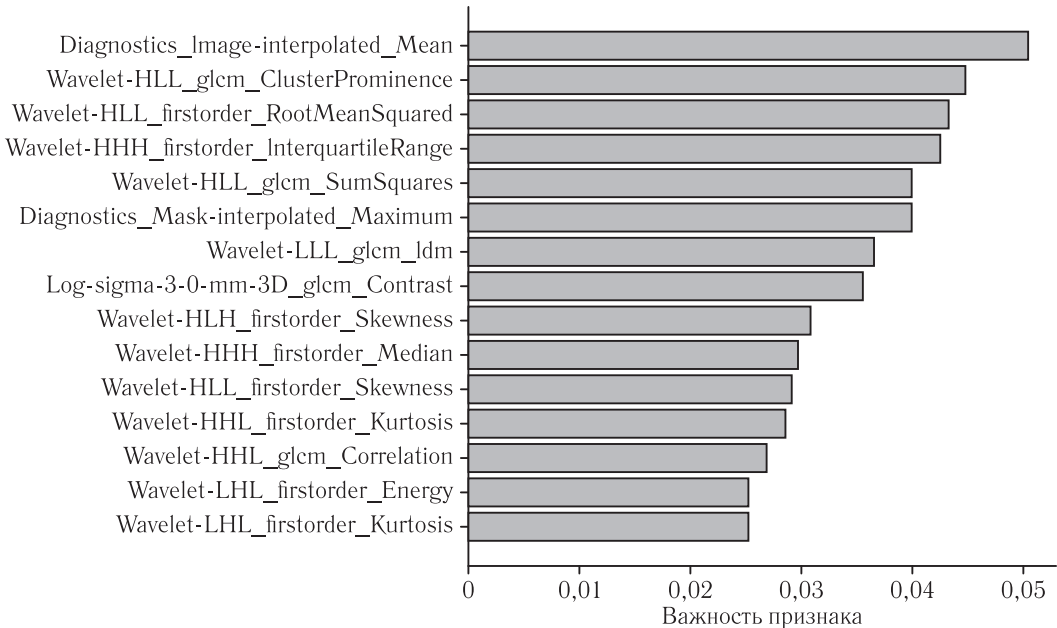


Рис. 5. Ранжирование признаков по степени важности для модели Random Forest
Fig. 5. Ranking features by importance for the Random Forest model

ниям, что согласуется с ростом асимметрии распределения уровней серого. Показатель wavelet-HLL_firstorder_RootMeanSquared имел среднюю SHAP-амплитуду +0,38 и отражал увеличение вариальности интенсивностей. На рис. 5 представлены параметры, отсортированные по их вкладу в классификацию степени дегенеративных изменений надостной мышцы.

Обсуждение. Результаты настоящего исследования подтверждают высокую информативность

хирургическим параметрам повреждения и может изменяться независимо от внутримышечных дегенеративных изменений.

На наш взгляд, продемонстрировано, что ряд текстурных радиомических характеристик коррелирует с клинически интерпретируемыми степенями дегенеративных изменений, заданными экспертной стратификацией по данным МРТ. Это важно с методологической точки зрения, поскольку целевая

метка в настоящей работе отражает интегральную визуальную оценку атрофии и жировой инфильтрации, а не морфологический стандарт; тем не менее согласованность направления изменений ключевых текстурных параметров с ожидаемыми паттернами тканевой гетерогенности поддерживает правдоподобность радиомических маркеров как количественных индикаторов дегенерации мышечной структуры.

Наибольшую диагностическую значимость показали признаки `log-sigma-3-0-mm-3D_firstorder_Skewness`, `wavelet-HHH_firstorder_Variance` и `wavelet-LLL_glm_ClusterShade`. Присутствие устойчивой корреляции между их значениями и стадиями патологических изменений подчеркивает связь между радиомическими параметрами и глубиной тканевой перестройки. Например, признак `Skewness`, как мера асимметрии распределения интенсивностей сигнала, демонстрировал рост на фоне увеличения степени жировой инфильтрации и утраты однородности сигнальных характеристик. Указанный признак ранее был предложен как потенциальный индикатор тканевой атрофии при оценке миопатий и мышечных дистрофий [18, 19].

Параметр `Cluster Shade` продемонстрировал аналогичную чувствительность к выраженности деструктивных изменений. Его рост, наблюдаемый при переходе от начальных к поздним стадиям, может свидетельствовать об усилении текстурной асимметрии и искаженности микроструктурных паттернов. Такие изменения особенно характерны для сочетанной фиброзно-жировой дегенерации, при которой наблюдается очаговое чередование сигнально неоднородных участков. Аналогичные наблюдения описаны в литературе при анализе мускулатуры поясничного отдела, где признаки текстурной нестабильности отражали клиническую тяжесть боли и функциональные ограничения [20, 21].

Радиомические характеристики, такие как `Skewness` и `Cluster Shade`, не являются абстрактными или математически изолированными; они связаны наблюдаемыми изменениями структуры ткани. Повышение асимметрии распределения интенсивностей и увеличение локальной неоднородности отражают морфологическую трансформацию, включающую атрофию, замещение функциональных волокон соединительной или жировой тканью, а также нарушение целостности архитектурного рисунка мышцы.

При интерпретации полученных результатов принципиально важно опираться на показатели внутренней валидации, рассчитанные на отложенных данных в рамках стратифицированной кросс-валидации, поскольку метрики на обучающих данных не характеризуют обобщающую способность модели и могут быть завышены на малых выборках. В настоящем исследовании совокупность метрик (`accuracy`, `macro F1-score`, κ и поклассовая чувствительность) указывает на умеренное согласие предсказаний модели с экспертной разметкой и одновре-

менно демонстрирует выраженную неоднородность качества между степенями, что, вероятно, обусловлено дисбалансом классов и частичным перекрытием радиомических паттернов на промежуточных стадиях. Таким образом, модель в текущей конфигурации может рассматриваться как вспомогательный инструмент, наиболее надежный для распознавания наиболее представленной категории и для выявления выраженных изменений при наличии типичных радиомических паттернов, тогда как дифференциация соседних степеней требует расширения выборки, усиления гармонизации протокола и/или применения дополнительных стратегий балансировки и калибровки вероятностных прогнозов.

Следует подчеркнуть, что большинство пациентов были отнесены ко 2-й степени, что обусловило выраженный дисбаланс классов. Такая особенность может повлиять на устойчивость модели и ее обобщающую способность при классификации менее представленных классов (0, 1 и 3). Для минимизации данного эффекта необходимо использовать стратифицированные методы валидации и подходы к балансировке данных, такие как весовые коэффициенты или методы синтетического увеличения выборки (например, `SMOTE`). Несмотря на это, устойчивость модели к переобучению была повышена путем предварительного исключения мультиколлинеарных признаков ($r > 0.9$), что позволило снизить избыточность признакового пространства и усилить интерпретируемость результатов.

Применение радиомики в оценке состояния надостной мышцы представляет собой логичное развитие направлений, уже успешно реализованных в онкологии [22, 23], нейрорадиологии [24] и кардиологической визуализации [25]. Наши данные подтверждают возможность использования радиомических признаков в области опорно-двигательного аппарата, где высокая гетерогенность ткани и сложность интерпретации МРТ-изображений требуют более точных инструментов оценки. В исследовании D. Lee и соавт. было показано, что текстурный анализ МРТ надостной мышцы позволяет оценить степень жировой инфильтрации, что в целом согласуется с результатами нашего исследования [26].

Клиническое применение выявленных признаков может включать автоматизированную стратификацию пациентов для дооперационной оценки риска, мониторинга динамики дегенеративных процессов или предсказания функционального восстановления после хирургического вмешательства. Потенциально радиомика может быть интегрирована в программное обеспечение рабочих станций МРТ, где после сегментации мышцы алгоритм в режиме реального времени оценивает степень повреждения и сопоставляет ее с предиктивной шкалой. В условиях роста телемедицины и ограниченных ресурсов такая система может значительно повысить эффективность диагностики и принятия клинических решений.

Выявленные в ходе работы методологические ограничения накладывают существенные рамки на клиническую применимость полученных результатов и требуют крайне осторожной интерпретации. Ключевой проблемой является выраженный дисбаланс классов в обучающей выборке, который привел к ограниченной способности модели дифференцировать крайние, но клинически значимые стадии патологии. Отсутствие внешней валидации на независимой когорте пациентов не позволяет сделать убедительные выводы об обобщающей способности алгоритма и его эффективности при использовании данных из других лечебных учреждений или на других МРТ-сканерах. Кроме того, в исследовании присутствовал элемент субъективизма, поскольку стратификация части пациентов проводилась вручную, что потенциально могло повлиять на итоговые метрики. Ввиду перечисленных факторов, несмотря на обнаружение устойчивого радиомического сигнала, текущая модель не может быть рекомендована для рутинного использования из-за высоких рисков, связанных с ее надежностью и воспроизводимостью.

Систематические обзоры радиомических моделей с применением машинного обучения подчеркивают, что на малых и несбалансированных выборках показатели качества могут быть нестабильными, а отсутствие внешней валидации существенно ограничивает обобщаемость результатов; поэтому при интерпретации метрик необходимо акцентировать внимание на покласовом качестве и рисках переобучения [27].

В настоящей работе основным классификатором выступал Random Forest; вместе с тем в качестве перспективного направления дальнейшей работы может рассматриваться оценка альтернативных постановок многоклассовой классификации, более гибко учитывающих дисбаланс классов и различную «стоимость» ошибок. В частности, может быть апробирован алгоритм, в котором построение решающего правила формулируется как задача линейного программирования со смешанными (в том числе булевыми) переменными и целевой функцией минимизации числа ошибок

классификации с учетом мощности (численности) каждого класса. Такая постановка позволяет явно регулировать вклад ошибок разных классов и тем самым адаптировать модель к дисбалансированным данным; подход основан на концепции ансамбля линейных разделителей для формирования «универсального» решения в многоклассовой классификации.

Выводы.

1. Разработан и внутренне валидирован радиомико-ориентированный инструмент для многоклассовой классификации дегенеративных изменений надостной мышцы на протонно-взвешенных МР-изображениях (протокол извлечения радиомических дескрипторов + модель Random Forest); показана принципиальная возможность количественной стратификации жировой инфильтрации.

2. Наибольшую информативность продемонстрировали текстурные радиомические признаки, преимущественно вейвлет-производные (ClusterProminence, RootMeanSquared, SumSquares), отражающие рост тканевой гетерогенности при прогрессировании дегенерации.

3. Качество модели неоднородно из-за дисбаланса классов: высокая чувствительность для наиболее представленной степени 2 ($Se=0,900$) сочетается с неудовлетворительной идентификацией степеней 1 и 3 ($Se=0,000$), поэтому подход применим как вспомогательный инструмент для подтверждения выраженных изменений и требует расширения данных, гармонизации протокола и внешней валидации для надежной дифференциации соседних степеней.

Заключение. Радиомический анализ протонно-взвешенных МРТ-изображений надостной мышцы в сочетании с моделью Random Forest продемонстрировал принципиальную применимость для количественной стратификации дегенеративных изменений мышечной ткани. Полученные результаты следует рассматривать как предварительные: для клинического внедрения необходимы расширение и балансировка выборки, гармонизация протоколов МРТ и внешняя валидация модели на независимых данных.

Сведения об авторах:

Жиляков Александр Андреевич — студент V курса института клинической медицины федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 620028, Свердловская область, Екатеринбург, ул. Репина, д. 3; e-mail: alexandrusma@mail.ru; ORCID 0000-0002-5251-0411;

Блинов Владислав Сергеевич — кандидат медицинских наук, заведующий рентгенодиагностическим отделением государственного автономного учреждения здравоохранения Свердловской области «Верхнепышминская центральная городская клиническая больница имени П. Д. Бородина»; 624090, Свердловская область, г. Верхняя Пышма, ул. Чайковского, д. 32; e-mail: VladSBlinov@mail.ru; ORCID 0000-0002-4677-8614;

Чернавин Павел Федорович — кандидат экономических наук, доцент кафедры «Аналитика больших данных и методы видеоанализа» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени Первого Президента России Б. Н. Ельцина»; 620062, Свердловская область, Екатеринбург, ул. Мира, д. 19; e-mail: chernavin.p.f@gmail.com; ORCID 0000-0003-3214-3906;

Жиляков Андрей Викторович — доктор медицинских наук, доцент кафедры травматологии и ортопедии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 620028, Свердловская область, Екатеринбург, ул. Репина, д. 3; e-mail: doctor-zhilyakov@rambler.ru; ORCID 0000-0003-1261-3712.

Information about the authors:

Alexander A. Zhilyakov — 5th-year student at the Institute of Clinical Medicine of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ural State Medical University» of the Ministry of Health of the Russian Federation; e-mail: alexandrusma@mail.ru; ORCID 0000–0002–5251–0411;

Vladislav S. Blinov — Cand. of Sci. (Med.), Head of the X-ray diagnostic department of «Verkhnepyshminskaya Central City Clinical Hospital named after P. D. Borodin»; e-mail: VladSBlinov@mail.ru; ORCID 0000–0002–4677–8614;

Pavel F. Chernavin — Cand. of Sci. (Econ.), Assoc. Prof. of the Department of Big Data Analytics and Video Analysis Methods «Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin», ORCID 0000–0003–3214–3906; e-mail: chernavin.p.f@gmail.com;

Andrey V. Zhilyakov — Dr. of Sci. (Med.), Assoc. Prof. of the Department of Traumatology and Orthopedics «Ural State Medical University»; e-mail: doctor-zhilyakov@rambler.ru; ORCID 0000–0003–1261–3712.

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства, согласно международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распределен следующим образом: концепция и план исследования — А. В. Жилияков, В. С. Блинов; сбор и анализ данных — А. В. Жилияков, В. С. Блинов; подготовка рукописи — А. В. Жилияков, В. С. Блинов, П. Ф. Чернавин, А. А. Жилияков.

Authors' contributions. All authors confirm their authorship according to the international ICMJE criteria (all authors made substantial contributions to the conception, research, and preparation of the article, and read and approved the final version before publication). Special contribution: AVZh, VSB aided in the concept and plan of the study; AVZh, VSB provided collection and analysis of data; AVZh, VSB, PFCh, AAZh preparation of the manuscript.

Потенциальный конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Disclosure: the authors declare that they have no competing interests.

Соответствие принципам этики: Исследование одобрено локальным этическим комитетом ФГБОУ ВО УГМУ Минздрава России и признано не требующим получения индивидуального информированного согласия ввиду ретроспективного анализа деперсонализированных МРТ-данных (решение ЛЭК УГМУ № 3 от 18.04.2025). Все данные перед включением в анализ были обезличены; исследование выполнено с соблюдением принципов биомедицинской этики и конфиденциальности медицинской информации.

Adherence to ethical standards: The study was approved by the Local Ethics Committee of Ural State Medical University and was determined not to require individual informed consent because the study was retrospective and used depersonalized MRI data (LEC decision No. 3 dated 18.04.2025). All data were anonymized before analysis; the study was conducted in accordance with the principles of biomedical ethics and confidentiality of medical information.

Поступила/Received: 06.10.2025

Принята к печати/Accepted: 29.05.2026

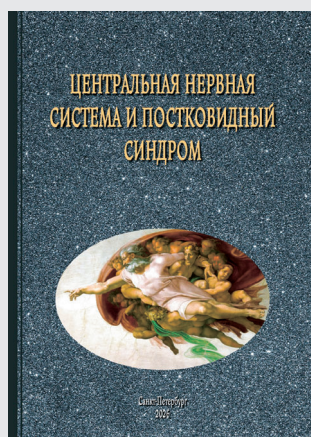
Опубликована/Published: 29.06.2026

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Peeters N.H.C., Kraats A.M., Krieken T.E. et al. The validity of ultrasound and shear wave elastography to assess the quality of the rotator cuff // *Eur. Radiol.* 2024. Vol. 34. P. 1971–1978. doi: 10.1007/s00330-023-10037-z.
- Werthel J.D., Boux C.F., Burdin V. et al. CT-based volumetric assessment of rotator cuff muscle in shoulder arthroplasty preoperative planning // *Bone Joint Open.* 2021. Vol. 2, No. 7. P. 552–561. doi: 10.1302/2633-1462.27.BJO-2021-0081.R1.
- Nozaki T., Tasaki A., Horiuchi S. et al. Quantification of Fatty Degeneration Within the Supraspinatus Muscle Using a 2-Point Dixon Method on 3-T MRI // *AJR Am. J. Roentgenol.* 2015. Vol. 205, No. 1. P. 116–122. doi: 10.2214/AJR.14.13518.
- Kissenberth M.J., Rulewicz G.J., Hamilton S.C. et al. A positive tangent sign predicts the reparability of rotator cuff tears // *J. Shoulder Elbow Surg.* 2014. Vol. 23, No. 7. P. 1023–1027. doi: 10.1016/j.jse.2014.02.014.
- Ro K., Kim J.Y., Park H. et al. Deep-learning framework and computer-assisted fatty infiltration analysis for the supraspinatus muscle in MRI // *Sci Rep.* 2021. Vol. 11. P. 15065. doi: 10.1038/s41598-021-93026-w.
- Kim J.Y., Ro K., You S. et al. Development of an automatic muscle atrophy measuring algorithm to calculate the ratio of supraspinatus in supraspinous fossa using deep learning // *Comput. Methods Programs Biomed.* 2019. Vol. 182. P. 105063. doi: 10.1016/j.cmpb.2019.105063.
- Fuchs B., Weishaupt D., Zanetti M. et al. Fatty degeneration of the muscles of the rotator cuff: assessment by computed tomography versus magnetic resonance imaging // *J. Shoulder Elbow Surg.* 1999. Vol. 8, No. 6. P. 599–605. doi: 10.1058/S1058-2746(99)90097-6.
- Fei Y., Wan Y., Xu L. et al. Novel methods to diagnose rotator cuff tear and predict post-operative Re-tear: Radiomics models // *Asia Pac. J. Sports Med. Arthrosc. Rehabil Technol.* 2024. Vol. 37. P. 14–20. doi: 10.1016/j.asmart.2024.03.003.
- Saavedra J.P., Droppelmann G., Garcia N., Jorquera C., Feijoo F. High-accuracy detection of supraspinatus fatty infiltration in shoulder MRI using convolutional neural network algorithms // *Front Med (Lausanne).* 2023. Vol. 10. P. 1070499. doi: 10.3389/fmed.2023.1070499.
- Ingebritsen R., Grogan B., Baer G., Cotter E. Deep learning accurately predicts supraspinatus pathology on shoulder magnetic resonance imaging // *Arthrosc Sports Med. Rehabil.* 2023. Vol. 5, No. 4. P. e1107–e1113. doi: 10.1016/j.asmr.2023.100807.
- Vasilev Y.A., Nanova O.G., Blokhin I.A. et al. Priority radiomic parameters for computed tomography of head and neck malignancies: A systematic review // *Digital Diagnostics.* 2024. Vol. 5, No. 2. P. 255–268. doi: 10.17816/DD623240.
- Xie J., Zhou M., Guo Z., Zhu Y., Jiang C.A. Quantitative Fatty Infiltration Evaluation of the Supraspinatus Muscle: Enhanced Clinical Relevance and Improved Diagnostic Value on Predicting Retear Compared With the Goutallier Classification // *Am. J. Sports Med.* 2025. Vol. 53, No. 4. P. 952–960. doi: 10.1177/036354652412313809.

13. Tian Z., Ni Y., He H. et al. Quantitative assessment of rotator cuff injuries using synthetic MRI and IDEAL-IQ imaging techniques // *Heliyon*. 2024. Vol. 10, No. 17. P. e37307. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e37307.
14. Chianca V., Bottino V., Cuocolo R., Zappia M. MRI Quantitative Evaluation of Muscle Fatty Infiltration // *Magnetochemistry*. 2023. Vol. 9, No. 4. Art. 111. doi: 10.3390/magnetochemistry9040111.
15. Cheng C., Liang X., Guo D., Xie D. Application of Artificial Intelligence in Shoulder Pathology // *Diagnostics (Basel)*. 2024. Vol. 14, No. 11. P. 1091. doi: 10.3390/diagnostics14111091.
16. Rodriguez H.C., Rust B., Hansen P.Y. et al. Artificial Intelligence and Machine Learning in Rotator Cuff Tears // *Sports Med. Arthrosc. Rev.* 2023. Vol. 31, No. 3. P. 67–72. doi: 10.1097/JSA.0000000000000371.
17. Khoruzhaya A.N., Ahkmad E.S., Semenov D.S. The role of the quality control system for diagnostics of oncological diseases in radiomics // *Digital Diagnostics*. 2021. Vol. 2, No. 2. P. 170–184. doi: 10.17816/DD60393.
18. Mercuri E., Pichiecchio A., Allsop J. et al. Muscle MRI in inherited neuromuscular disorders: past, present, and future // *J. Magn. Reson. Imaging*. 2007. Vol. 25, No. 2. P. 433–440. doi: 10.1002/jmri.20804.
19. Sudol-Szopinska I., Jacques T., Gietka P., Cotten A. Imaging in dermatomyositis in adults and children // *J. Ultrason.* 2020. Vol. 20, No. 80. P. e36–e42. doi: 10.15557/JoU.2020.0007.
20. Zhan J., Liu S., Dong C. et al. Shoulder MRI-based radiomics for diagnosis and severity staging assessment of surgically treated supraspinatus tendon tears // *Eur. Radiol.* 2023. Vol. 33, No. 8. P. 5587–5593. doi: 10.1007/s00330-023-09523-1.
21. Mannil M., Burgstaller J.M., Held U. et al. Correlation of texture analysis of paraspinal musculature on MRI with different clinical endpoints: Lumbar Stenosis Outcome Study (LSOS) // *Eur. Radiol.* 2019. Vol. 29, No. 1. P. 22–30. doi: 10.1007/s00330-018-5552-6.
22. Larue R.T., Timmeren J.E., Jong E.E.C. et al. Influence of gray level discretization on radiomic feature stability for different CT scanners, tube currents and slice thicknesses: a comprehensive phantom study // *Acta Oncol.* 2017. Vol. 56, No. 11. P. 1544–1553. doi: 10.1080/0284186X.2017.1351624.
23. Shi H., Duan Y., Shi J. et al. Role of preoperative prediction of microvascular invasion in hepatocellular carcinoma based on the texture of FDG PET image: A comparison of quantitative metabolic parameters and MRI // *Front Physiol.* 2022. Vol. 13. P. 928969. doi: 10.3389/fphys.2022.928969.
24. Aerts H.J., Velazquez E.R., Leijenaar R.T. et al. Decoding tumour phenotype by noninvasive imaging using a quantitative radiomics approach // *Nat. Commun.* 2014. Vol. 5. P. 4006. doi: 10.1038/ncomms5006.
25. Gillies R.J., Kinahan P.E., Hricak H. Radiomics: images are more than pictures, they are data // *Radiology*. 2016. Vol. 278, No. 2. P. 563–577. doi: 10.1148/radiol.2015151169.
26. Lee D., Hong K.-T., Lee W. et al. Threshold-based quantification of fatty degeneration in the supraspinatus muscle on MRI as an alternative method to Goutallier classification and single-voxel MR spectroscopy // *BMC Musculoskelet Disord.* 2020. Vol. 21, No. 1. P. 362. doi: 10.1186/s12891-020-03400-4.
27. Danilov G.V., Agrba S.B., Strunina Yu.V. et al. Radiomics and Machine Learning in Diagnostics of Glial Brain Tumors: a Systematic Review and Meta-Analysis // *Sovrem. Tekhnologii Med.* 2025. Vol. 17, No. 6. P. 69–79. doi: 10.17691/stm2025.17.6.07.

Уважаемые коллеги!



Издательством «Балтийский медицинский образовательный центр» подготовлена монография «Центральная нервная система и постковидный синдром» под редакцией академика РАН Н. А. Белякова и профессора В. В. Рассохина. В ней рассмотрены проявления постковидного синдрома (ПКС), нейропатогенез, вопросы диагностики, основные причины длительного сохранения психоневрологической симптоматики, нарушений высшей нервной деятельности и других проявлений, вошедшие в МКБ-10 как U09.9 «Состояние после COVID-19 неуточненное». ПКС рассматривается как следствие вирусного воспаления с локализацией в разных тканях, в том числе в головном мозге, которое приобрело новое патогенетическое свойство за счет вовлечения комплекса иммунных и неспецифических процессов, нарушая комплекс регуляции основных функций, отягощающих состояние пациентов. Разнообразие клинической картины и сочетание симптоматики ПКС определяют необходимость персонализации процесса восстановления пациентов. Монография предназначена и рекомендуется врачам неврологам, инфекционистам, терапевтам и другим, принимающим участие в лечении пациентов с ПКС, а также студентам старших курсов, клиническим ординаторам и аспирантам.

ISBN 978-5-6053730-1-8

Подробную информацию о книге можно получить на сайте издательства:

<https://www.bmoc-spb.ru>.

РЕНТГЕНОВСКАЯ ДЕНСИТОМЕТРИЯ КАК ИНСТРУМЕНТ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МИНЕРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ КОСТЕЙ У ДЕТЕЙ С СИНДРОМОМ МАЛЬАБСОРБЦИИ: ПРОСПЕКТИВНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

¹Е. А. Мельникова[✉], ¹М. В. Редькина[✉], ¹К. К. Панунцева[✉], ²Н. В. Марченко[✉]

¹Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

ВВЕДЕНИЕ: Проявления остеопороза на фоне синдрома мальабсорбции обусловлены нарушением всасывания микроэлементов в тонком кишечнике, что является актуальной проблемой педиатрии. Применение рентгеновской денситометрии имеет свои преимущества перед другими вариантами диагностики (такими как ультразвуковая денситометрия и КТ-денситометрия с использованием фантома). Оценка данных по остеопорозу и остеопоротическим переломам у детей представляет сложности, связанные как с малосимптомностью данной патологии, так и с недостаточным количеством критериев диагностики данного заболевания. Одним из самых значимых осложнений остеопороза являются низкоэнергетические переломы, которые способствуют снижению качества жизни и даже могут привести к ранней инвалидизации. Выявление факторов риска, своевременная профилактика и заблаговременное начало лечения позволяют улучшить качество жизни пациентов в периоде взросления.

ЦЕЛЬ: Улучшить алгоритм анализа протокола двухэнергетической рентгеновской абсорбциометрии в педиатрии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ: Основными показателями, которые могут охарактеризовать состояние костной ткани пациента, являются минеральная плотность костной ткани (МПК) и содержание костного минерала. В клинической практике скрининговая диагностика остеопороза основывается именно на определении их уровня. Для сбора данных МПК были выбраны протоколы денситометрического сканирования поясничного отдела позвоночника (позвонков L₁₁–L₁₄). В процессе исследования отсканировано 98 пациентов гастроэнтерологического профиля. Критериями отбора пациентов для проведения двухэнергетической рентгеновской абсорбциометрии были: прием пероральных кортикостероидов более 3 месяцев в дозировке более 5 мг/сут, задержка полового созревания, два и более перелома длинных костей скелета к возрасту 10 лет, введение золедроновой кислоты хотя бы 1 раз в анамнезе и состоянии, приводящие к нарушению всасывания в кишечнике. Анализ состояния костного метаболизма производился с учетом как коридорного значения (Z-критерия), так и индивидуальной количественной МПК, выраженной в г/см².

РЕЗУЛЬТАТЫ: Двухэнергетическая рентгеновская абсорбциометрия при корректном алгоритме проведения протокола исследования и скорректированной интерпретации полученных значений персонализировано на каждого пациента открывает клиницистам новые диагностические возможности как для оценки первичного состояния костной ткани пациента, так и для динамического наблюдения.

ОБСУЖДЕНИЕ: Следует отметить, что выполнение двухэнергетической рентгеновской абсорбциометрии методически отработано у детей в возрасте от 5 до 17 лет. Особенности проведения данной методики и интерпретации результатов обследования пациентов младше 5 лет требуют более детального изучения и тестирования методики с целью более качественного анализа полученного материала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ: Персонализированный подход в анализе результатов двухэнергетической рентгеновской абсорбциометрии позволяет снизить гипердиагностику и корректно зафиксировать стартовую точку для дальнейшего наблюдения набора МПК с количественной оценкой в динамике. Стандартизация подхода в анализе остеоденситометрического исследования формирует возможность не только оценивать состояние МПК, но и определить качество костного метаболизма, что служит профилактикой развития возможных осложнений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: минеральная плотность, мальабсорбция, остеопороз, остеопения, денситометрия

* Для корреспонденции: Мельникова Екатерина Андреевна, kea13doc@gmail.com

Для цитирования: Мельникова Е.А., Редькина М.В., Панунцева К.К., Марченко Н.В. Рентгеновская денситометрия как инструмент определения минеральной плотности костей у детей с синдромом мальабсорбции: проспективное исследование // *Лучевая диагностика и терапия*. 2026. Т. 17, № 2. С. 110–116, doi: <http://doi.org/10.22328/2079-5343-2026-17-2-110-116>.

X-RAY DENSITOMETRY AS A TOOL FOR DETERMINING BONE MINERAL DENSITY CHILDREN WITH MALABSORPTION SYNDROME: A PROSPECTIVE STUDY

¹Ekaterina A. Melnikova[✉], ¹Maria V. Redkina[✉], ¹Karina K. Panuntseva[✉], ²Natalia V. Marchenko[✉]

¹St. Petersburg State Pediatric Medical University, St. Petersburg, Russia

²St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

INTRODUCTION: Osteoporosis manifestations in the context of malabsorption syndrome result from impaired intestinal micronutrient absorption, representing a significant challenge in pediatric practice. While various modalities exist, dual-energy X-ray absorptiometry offers distinct advantages over ultrasound densitometry or quantitative computed tomography. Interpreting osteoporosis and osteoporotic fracture risk in children is particularly complex due to the often oligosymptomatic presentation and the limited availability of robust pediatric diagnostic criteria. Low-energy fractures, a major complication, significantly diminish quality of life and contribute to premature disability. Early identification of risk factors, coupled with timely prophylactic and therapeutic interventions, is crucial for improving long-term outcomes in this growing population.

OBJECTIVE: To refine the interpretive algorithm for dual-energy X-ray absorptiometry (DXA) reports in a pediatric cohort.

MATERIALS AND METHODS: Bone mineral density (BMD) and bone mineral content (BMC) serve as the principal surrogate markers for assessing bone health. Clinical screening for osteoporosis fundamentally relies on quantifying these parameters. For this analysis, we selected DXA scan protocols for total body less head (TBLH) and the lumbar spine (L_{II}–L_{IV}). The study cohort comprised 98 pediatric patients with gastroenterological conditions. Indications for DXA evaluation included: chronic oral corticosteroid therapy (>3 months duration, >5 mg/day), delayed puberty, a history of two or more long bone fractures by age 10, prior administration of zoledronic acid, and conditions associated with intestinal malabsorption. Assessment of bone metabolism included the Z-score and individual quantitative BMD (g/cm²).

RESULTS: When employing a rigorous, standardized acquisition protocol coupled with patient-specific interpretation of age- and sex-appropriate reference data, DXA provides clinicians with enhanced diagnostic capability. This approach facilitates accurate baseline assessment of bone mineral status and enables sensitive monitoring of longitudinal changes, thereby guiding therapeutic management in this vulnerable population.

DISCUSSION: It is important to emphasize that the examination protocol has been methodically validated in children aged 5–17 years. Nevertheless, the procedural specifics and interpretation of results in patients younger than 5 years warrant further investigation and methodological refinement to improve the accuracy of data analysis.

CONCLUSION: Adopting a personalized analytical approach minimizes the risk of overdiagnosis and allows for precise identification of the baseline value for longitudinal monitoring of bone mineral density (BMD) accumulation, including quantitative follow-up assessments. Standardization of the analytical framework in densitometric studies not only facilitates BMD evaluation but also enables assessment of bone metabolism quality and prevention of potential complications.

KEYWORDS: mineral density, malabsorption, osteoporosis, osteopenia

* For correspondence: Ekaterina A. Melnikova, e-mail: kea13doc@gmail.com

For citation: Melnikova E.A., Redkina M.V., Panuntseva K.K., Marchenko N.V. X-Ray densitometry as a tool for determining bone mineral density children with malabsorption syndrome: a prospective study // *Diagnostic radiology and radiotherapy*. 2026. Vol. 17, No. 2. P. 110–116, <http://doi.org/10.22328/2079-5343-2026-17-2-110-116>.

Введение. Костная масса остается основным показателем костной плотности, а двухэнергетическая рентгеновская абсорбциометрия (dual energy X-ray absorptiometry — DXA) является «золотым стандартом» диагностики остеопороза.

Применение двухэнергетической рентгеновской денситометрии имеет свои преимущества перед другими вариантами лучевой диагностики (такими как ультразвуковая денситометрия и КТ-денситометрия с использованием фантома). Метод DXA является малоинвазивным, требует минимального участия пациента, дает возможность количественного анализа компонентного состава тела. Показателями качества костного формирования являются минеральная плотность костной ткани (МПК) и содержание костного минерала. В процессе полового развития у здоровых детей происходит

нарастание костной массы и плотности кости, достигая максимальных величин к V стадии полового развития по Таннеру [5]. Наиболее интенсивное накопление МПК происходит между II и III стадиями полового развития. В клинической практике скрининговая диагностика остеопороза основывается именно на определении уровня МПК и костного минерала, но первостепенное значение отводится именно показателям МПК.

Несмотря на доступность такого метода исследования, как традиционная рентгенография, она не является методом скрининговой диагностики остеопороза, так как снижение костной массы может фиксироваться диагностом, когда потери костной ткани составляют более 30–40%.

Проявления остеопороза на фоне синдрома мальабсорбции обусловлены нарушением всасывания

микроэлементов в тонком кишечнике, что является актуальной проблемой педиатрии. У 25% детей с синдромом мальабсорбции и при целиакии отмечается снижение МПК [2, 4], что может привести к длительной реабилитации при возникновении осложнений. Одним из самых значимых осложнений остеопороза являются низкоэнергетические переломы, которые ведут к снижению качества жизни и даже могут привести к ранней инвалидизации пациента. Выявление факторов риска, своевременная профилактика и заблаговременное начало лечения позволят улучшить качество жизни данной группы пациентов в периоде взросления.

Цель. Улучшить алгоритм анализа протокола двухэнергетической рентгеновской абсорбциометрии в педиатрии.

Материалы и методы. Исследование одобрено этическим комитетом ФГБОУ ВО СПбГПМУ МЗ РФ, протокол № 60/08, от 24.10.2025 г. Информированное согласие получено от каждого законного представителя.

В процессе сбора данных было обследовано 98 пациентов гастроэнтерологического отделения с диагнозами по МКБ-10:

- K52.2 Аллергический и алиментарный гастроэнтерит и колит;
- K90.9 Нарушение всасывания в кишечнике неуточненное;
- K50.8 Другие разновидности болезни Крона;
- K73.2 Хронический активный гепатит, не классифицированный в других рубриках;
- K86.1 Другие хронические панкреатиты;
- K51.8 Другие язвенные колиты;
- K74.6 Другой и неуточненный цирроз печени;
- K90.8 Другие нарушения всасывания в кишечнике;
- K90.0 Целиакия.

Денситометрия (DXA) выполнялась пациентам гастроэнтерологического профиля при наличии таких показаний, как:

- 1) прием пероральных кортикостероидов более 3 месяцев в дозировке более 5 мг/сут;
- 2) задержка полового созревания;
- 3) два и более перелома длинных костей скелета к возрасту 10 лет;
- 4) введение золедроновой кислоты хотя бы 1 раз в анамнезе;
- 5) воспалительные заболевания кишечника (снижение плотности костей отмечено у 30% детей с воспалительными заболеваниями кишечника и хроническими гепатитами) [1].

Сбор данных выполнялся с учетом укладок и режимов сканирования, стандартизированных международным обществом по клинической денситометрии. Низкие и очень низкие значения МПК требуют дополнительного анализа, в который входит определение уровня кальция, фосфора, щелочной фосфатазы, с-концевого телопептида, остеокальци-

на, паратгормона, пиридинолина, оксипролина в биохимическом анализе крови, оценка экскреции кальция и фосфора с мочой, что поможет врачу дополнительно оценить динамику костного метаболизма и назначить необходимую терапию по коррекции остеопении. Также необходимо повторное исследование у данной группы пациентов через 3 месяца для определения динамики процесса [3].

Результаты. Для корректного ответа на вопрос о состоянии костной ткани пациента следует производить оценку данных, полученных при протоколе сканирования поясничного отдела позвоночника. В классическом видении протокола, представленного в аппаратном обеспечении, врача-рентгенолога призывают к анализу области L₁–L₄ и формированию ответа на основании Z-критерия, который будет характеризовать «нормальное значение МПК» до 2 стандартных отклонений от среднего значения у молодых представителей здоровой популяции. Далее индивидуальная МПК сравнивается с референсной базой. Наиболее распространенная база — NHANES III (National Health and Nutrition Examination Survey — NHANES), полученная по данным третьего Национального обследования состояния здоровья и питания — американская национальная программа социального исследования, проводимая Национальным центром статистики здравоохранения США с целью среднестатистической оценки состояния здоровья и питания американцев. Сравнительная оценка полученных значений МПК у детей Российской Федерации должна проводиться с базами референсных значений, разработанных в регионе обитания детей, так как культура питания, продуктовая корзина и климатические условия проживания и рождения детей (течение беременности и условия постнатального содержания) сильно различаются даже в разных регионах России. Таким образом, сравнение с американскими нормативными значениями лишает исследование диагностической ценности. В процессе нашей работы при тесном сотрудничестве с клиницистами различного профиля было выявлено, что полное подчинение алгоритмам аппарата приводит к гипердиагностике.

По этой причине нами было предложено изменить подход в алгоритме описания денситометрического исследования у детей, а именно для фиксации старта терапевтического вмешательства и регистрации состояния костного метаболизма использовать индивидуальную МПК, выраженную в единицах измерения г/см². Особую важность данный метод представляет для детей до 5 лет, так как для них отсутствуют базы референсных значений и формирование выводов о норме и снижении МПК на основании коридорного значения (Z-критерия) для них недоступно, но фиксация состояния МПК в количественном эквиваленте (г/см²) с возможностью динамического наблюдения и расчета скорости набора МПК дает ответ о состоянии реминерализа-

ции костной ткани в отсроченном периоде, а также позволяет оценить влияние препаратов и состояний, воздействующих на костную ткань.

Первостепенно для персонализации анализа у пациента должны быть учтены актуальные данные костного возраста (на основании проведенной не позднее 6 месяцев назад рентгенограммы лучезапястных суставов с формированием заключения о состоянии ядер окостенения по методу Greulich-Pyle [8]) и линейного роста, что позволяет адаптировать полученные данные на состояние пациента с учетом его индивидуальной изменчивости. Принимая во внимание информацию по базам референсных значений, которая указана выше, хотелось бы предложить изменить подход в оценке значений МПК у детей. Рассматривать результатом исследования не Z-критерий, а непосредственно значение МПК, выраженное в г/см². Именно этот показатель может дать клиницисту наиболее обширную панель понимания процесса реминерализации кости и хода лечения пациента. В педиатрии минимальные изменения в большую и меньшую сторону позволяют изменить диету, план лечения и ведения пациента.

денситометрии в клинической практике» (2015), учитывают МПК области L_{II}–L_{IV} и позволяют произвести корректировку полученных на аппарате значений с учетом региональной принадлежности, формируя вывод с учетом всех вводных анамнеза.

При сопоставлении аппаратных значений с данными МПК с применением персонализированной корректировки было выявлено, что совпадение результатов отмечается только у 29,4 % пациентов, у 25,2 % пациентов аппаратные значения выдавали низкую МПК (Z-показатель –2,2 и меньше), а при корректировке значений на данные линейного роста и костного возраста значения переходили в коридор между нормой и 1 стандартным отклонением. Наиболее яркие клинические примеры представлены ниже.

Пациент 1. Поступил в клинику университета с синдромом мальабсорбции, тяжелое течение (аутоиммунная энтеропатия, тяжелое течение). Жалобы на недостаточные весо-ростовые прибавки. С учетом наличия аутоиммунной энтеропатии в терапии начат курс преднизолона 15 мг/сут с 2017 года. При денситометрии позвоночника (L_{II}–L_{IV}) МПК* составила 0,517 г/см² (по данным Lunar

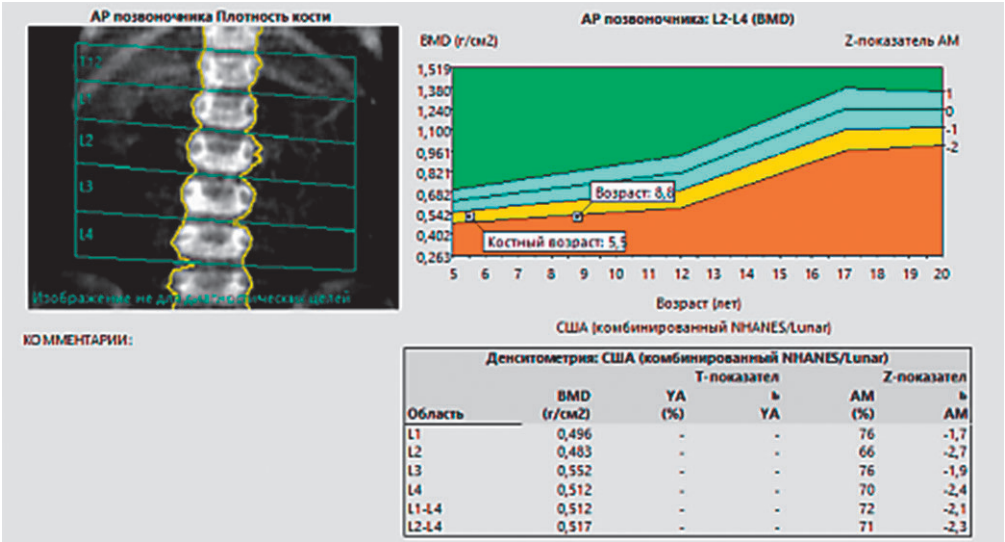


Рис. 1. Денситометрия поясничного отдела позвоночника (L_{II}–L_{IV}) пациента 1

Примечание: BMD — минеральная плотность костной ткани (МПК). При денситометрии позвоночника (L_{II}–L_{IV}) МПК* составила 0,517 г/см² (по данным Lunar Prodigy Advance), Z-показатель составил –2,3. По данным расчета аппаратного обеспечения у пациента определяется низкое значение МПК.

Fig. 1. Dual-energy X-ray absorptiometry (DXA/DEXA) of the lumbar spine (L_{II}–L_{IV}) patient 1

Note: BMD (bone mineral density) was measured at 0.517 g/cm², during lumbar spine densitometry (L_{II}–L_{IV}), as assessed by the Lunar Prodigy Advance system. The Z-score was –2.3. According to the system’s software calculation, the patient has a low BMD value.

К сожалению, Z-критерий не позволяет оценить минимальные изменения костного ремоделирования и определить тенденцию к набору или потере МПК. Следовательно, упускается момент фиксации ответа на терапию вследствие стабилизации или потери МПК, что важно пациентам гастроэнтерологического профиля с воспалительными заболеваниями кишечника и как следствие нарушением всасывания микроэлементов в тонком кишечнике. Таблицы референсных значений, представленные в методических рекомендациях «Возможности костной рентгеновской

Prodigy Advance), Z-показатель составил –2,3 (рис. 1).

Без коррекции на данные линейного роста и костного возраста значения МПК расценивались как низкие, и результаты исследования могли привести к гипердиагностике. После персонализированной корректировки значения минеральной плотности костной ткани перешли в коридоры между нормой и одним стандартным отклонением, что доказывает диагностическую неточность аппаратного расчета (таблица).

Таблица

Сравнение стандартного протокола денситометрического исследования и персонализированного анализа

Table

Comparison between the standard densitometric examination protocol and a personalized analytical method

Область интереса	По стандартному протоколу	Персонализированная корректировка
L _I –L _{IV}	МПК 0,512 г/см ² Z-критерий –2,1	Нет баз референсных значений РФ
L _{II} –L _{IV}	МПК 0,517 г/см ² Z-критерий –2,3	МПК 0,517 г/см ² Z-критерий между значениями нормы и 1 стандартного отклонения

Пациент 2. Поступил в клинику университета с жалобами на неустойчивый стул со слизью, периодические боли в животе. Поступил для верификации диагноза. Сопутствующий диагноз: «ювенильный ревматоидный артрит». Пациенту была проведена денситометрия в 2024 и 2025 гг. для динамического наблюдения. Используя предложенный алгоритм описания с учетом динамических изменений состояния МПК было выявлено, что на фоне ЮРА и воспалительных заболеваний кишечника у пациента отмечается нарушение костного ремоделирования. При этом Z-критерий в 2025 г. при исследовании составлял –1,0, что входит в коридор нормы, и при изолированной оценке этого показателя можно было сделать вывод, что у пациента нет картины нарушения костного метаболизма, таким образом, могло быть упущено время для подбора стабилизирующей терапии.

Обсуждение. Проанализировав подход к методике исследования минеральной плотности костной

ткани у детей во всем мире и изучив ситуацию с прогрессированием остеопении и остеопороза у детей в России, исследователи выявили проблему скрининговой диагностики данных состояний у детей. Оценка эпидемиологических данных по остеопорозу и остеопоротическим переломам у детей представляет определенные трудности, связанные как с малосимптомностью данной патологии, так и с использованием различных подходов и критериев в диагностике данного заболевания. Учитывая отсутствие унифицированных терминологических и диагностических критериев остеопороза, данные о распространенности этой патологии у детей достаточно противоречивы, имеет место недостаток крупных эпидемиологических исследований по данной проблеме. Международное общество по клинической денситометрии (The international Society For Clinical Densitometry — ISCD) регулярно обновляет рекомендации по коррекции методики проведения

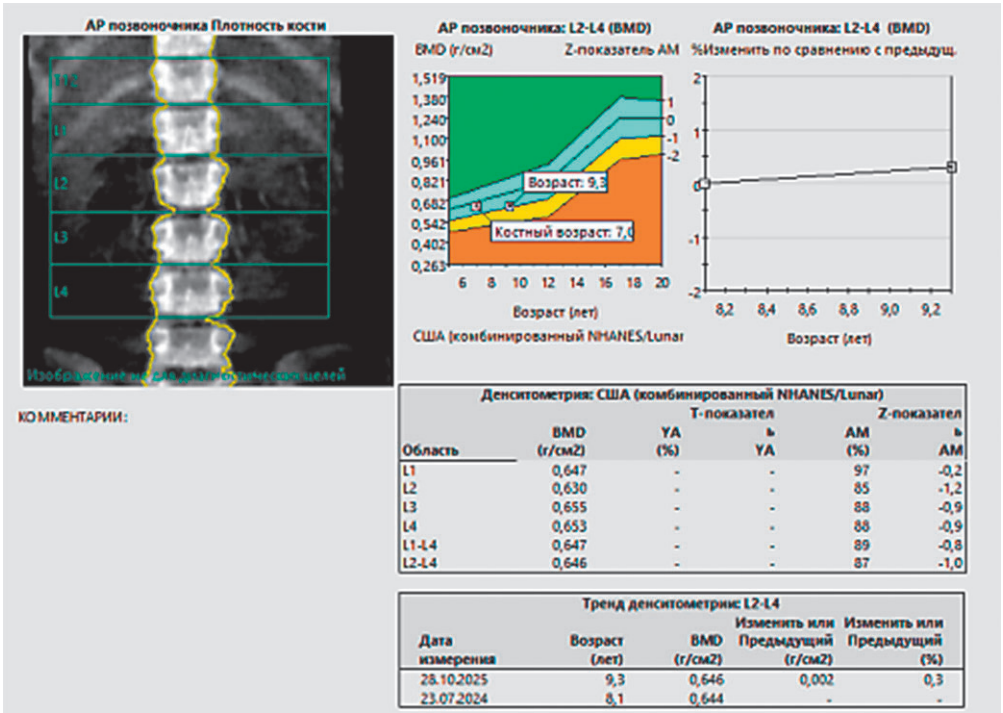


Рис. 2. Денситометрия поясничного отдела позвоночника (L_{II}–L_{IV}) пациента 2

Примечание: BMD — минеральная плотность костной ткани (МПК). При денситометрии позвоночника (L_{II}–L_{IV}) МПК* составила 0,644 г/см² в 2024 году и 0,646 г/см² в 2025 году (по данным Lunar Prodigy Advance) Z-показатель в 2025 г. составил –1,0.

Fig. 2. Dual-energy X-ray absorptiometry (DXA/DEXA) of the lumbar spine (L_{II}–L_{IV}) — Patient 2

Note: BMD (bone mineral density) was 0.644 g/cm² in 2024 and 0.646 g/cm² in 2025, as measured by lumbar spine densitometry (L_{II}–L_{IV}) using the Lunar Prodigy Advance system. In 2025, the Z-score was –1.0.

и анализа двухэнергетической абсорбциометрии, но выполнение DXA методически отработано у детей в возрасте от 5 до 17 лет, при этом особенности проведения метода и интерпретации результатов у пациентов младше 5 лет требуют более детального изучения и тестирования с целью более качественного анализа полученного материала.

Сложности методики связаны с эмоциональной лабильностью пациентов, сложностями выполнения укладок и отсутствием унифицированных нормативных баз. Несмотря на отсутствие единой методики и протоколов описания у детей до 5 лет, есть статьи, которые отражают необходимость изучения МПК детей начиная с периода новорожденности, так как коррекция нарушений костного метаболизма на ранних этапах снижает риск инвалидизации пациентов в отсроченном периоде. Наибольший интерес в изучении этого вопроса представляют недоношенные дети, дети с дефицитом витамина D, целиакией и синдромом короткой кишки [6, 7]. Именно поэтому с учетом специфики клиники университета в перспективе планируется решать вопрос объективной сложности проведения двухэнергетической рентгеновской абсорбциометрии у детей до 5 лет, так как разработка протокола метода для юных пациентов позволит выполнить сбор

статистических данных и расширить базу референсных значений в РФ.

Скрининговая диагностика состояний, приводящих к снижению МПК должна начинаться с ранних декад жизни, а ограниченность нормативных баз, ввиду их отсутствия, снижает клиническую ценность метода DXA и приводит к позднему выявлению нарушений костного метаболизма с развитием осложнений и снижением качества жизни пациентов в периоде взросления.

Заключение. Персонализированный подход в анализе результатов двухэнергетической рентгеновской абсорбциометрии продемонстрировал клиническую значимость и позволил снизить гипердиагностику, корректно зафиксировать стартовую точку для динамического наблюдения набора МПК с количественной оценкой. Разработка баз до 5 лет необходима, так как в прогрессирование и распространенность остеопороза возрастают. Стандартизация и унифицирование индивидуального подхода в анализе остеоденситометрического исследования формируют возможность не только оценивать состояние МПК, но и определить качество костного метаболизма, что служит профилактикой развития возможных осложнений на фоне состояний, приводящих к нарушениям костного метаболизма.

Сведения об авторах:

Мельникова Екатерина Андреевна — ассистент кафедры топографической анатомии имени профессора Ф. И. Валькера, врач-рентгенолог рентгеновского отделения с кабинетом радионуклидной диагностики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 194100, Санкт-Петербург, Литовская ул., д. 2; e-mail: kea13doc@gmail.com; ORCID 0009–0004–2443–0344;

Редькина Мария Васильевна — ассистент кафедры педиатрии имени академика А. Ф. Тура федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 194100, Санкт-Петербург, Литовская ул., д. 2; e-mail: redkina_masha@mail.ru; ORCID 0009–0007–5084–6839;

Панунцева Карина Константиновна — кандидат медицинских наук, заведующий рентгеновского отделения с кабинетом радионуклидной диагностики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 194100, Санкт-Петербург, Литовская ул., д. 2; e-mail: kpanuntseva@mail.ru; ORCID 0009–0009–2820–4762;

Марченко Наталья Викторовна — доктор медицинских наук, доцент кафедры лучевой диагностики Медицинского института федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»; 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7/9; e-mail: gmv2006@mail.ru; ORCID 0000–0002–2684–9980.

Information about the authors:

Ekaterina A. Melnikova — Assistant at the Department of Topographic Anatomy named after Professor F.I. Walker, Radiologist at the X-ray Department with a Radioisotope Diagnostics Office, St. Petersburg State Pediatric Medical University (SPBSPMU), 2 Litovskaya Street, St. Petersburg, 194100, Russia; e-mail: kea13doc@gmail.com; ORCID 0009–0004–2443–0344;

Maria V. Redkina — Assistant at the Department of Pediatrics named after Academician A. F. Tur St. Petersburg State Pediatric Medical University (SPBSPMU), 2 Litovskaya Street, St. Petersburg, 194100, Russia; e-mail: redkina_masha@mail.ru; ORCID 0009–0007–5084–6839;

Karina K. Panuntseva — Cand. of Sci. (Med.), Head of the X-ray Department with a Radioisotope Diagnostics Office, St. Petersburg State Pediatric Medical University (SPBSPMU), 2 Litovskaya Street, St. Petersburg, 194100, Russia; e-mail: kpanuntseva@mail.ru; ORCID 0009–0009–2820–4762;

Natalia V. Marchenko — Dr. of Sci. (Med.), Associate Professor at the Department of Radiation Diagnostics, Medical Institute of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education St. Petersburg State University (SpbSU) 7/9 Universitetskaya Embankment, St. Petersburg, 199034, Russia; e-mail: gmv2006@mail.ru; ORCID 0000–0002–2684–9980.

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства, согласно международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распределен следующим образом: концепция и план исследования — *Е. А. Мельникова, Н. В. Марченко*; сбор и анализ данных — *Е. А. Мельникова, М. В. Редькина, К. К. Панунцева*; подготовка рукописи — *Е. А. Мельникова, Н. В. Марченко*.

Authors' contributions. All authors confirm their authorship according to the international ICMJE criteria (all authors made substantial contributions to the conception, research, and preparation of the article, and read and approved the final version before publication). Special contribution: *EAM*, *NVM* aided in the concept and plan of the study; *EAM*, *MVR*, *KKP* provided collection and analysis of data; *EAM*, *NVM* preparation of the manuscript.

Потенциальный конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Disclosure: the author declares no conflict of interest.

Соответствие принципам этики: исследование одобрено этическим комитетом ФГБОУ ВО СПбГПМУ МЗ РФ, протокол № 60/08, от 24.10.2025 г. Информированное согласие получено от каждого законного представителя.

Adherence to ethical standards: the study was approved by the local ethics committee of the St. Petersburg State Pediatric Medical University (SPbSPMU) Protocol No. 60/08, dated October 24, 2025. Informed consent was obtained from each legal representative.

Поступила/Received: 28.10.2025

Принята к печати/Accepted: 29.05.2026

Опубликована/Published: 29.06.2026

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Herzog D., Bishop N., Glorieux F., Seidman E.G. Interpretation of bone mineral density values in pediatric Crohn's disease // *Inflamm Bowel Dis*. 1998. Vol. 4, No. <Нет>4. P. 261–267. doi: 10.1002/ibd.3780040402.
2. Бельмер С.В. Клинические проявления целиакии: на пути к ранней диагностике // *Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология*. 2021. № 4. С. 106–115. [Bel'mer S.V. Clinical manifestations of celiac disease: towards early diagnosis. *Experimental and clinical gastroenterology*, 2021, No. 4, pp. 106–115 (In Russ.)]. doi: 10.31146/1682-8658-ecg-188-4-106-115.
3. Таранушенко Т.Е., Киселева Н.Г. Остеопороз в детском возрасте: особенности минерализации скелета у детей, профилактика и лечение // *Медицинский совет*. 2020. № 10. С. 164–171. [Taranushenko T.T., Kiseleva N.G. Osteoporosis in childhood: characteristics of skeletal mineralization in children, prevention, and treatment. *Medical Council*, 2020, No. 10, pp. 164–171 (In Russ.)]. doi: 10.21518/2079-701X-2020-10-164-171.
4. Почкайло А.С., Галашевская А.А., Водянова О.В. Состояние минеральной плотности костной ткани у детей с целиакией // *Российский педиатрический журнал*. 2022. № 3 (1). С. 245. [Pochkaylo A.S., Galashevskaya A. A., Vodyanova O.V. Bone mineral density in children with celiac disease. *Russian Pediatric Journal*, 2022, No. 3 (1), pp. 245 (In Russ.)]. doi: 10.34883/RPJ.2022.3.1.245.
5. Короткова Т.А. Минеральная плотность костной ткани у подростков // *Остеопороз и остеопатии*. 2004. № 2. С. 31–35. [Korotkova T.A. Bone mineral density in adolescents. *Osteoporosis and osteopathy*, 2004, No. 2, pp. 31–35 (In Russ.)].
6. Duppe H., Cooper C., Gardsell P., Johnell O. The relationship between childhood growth, bone mass, and muscle strength in male and female adolescents // *Calcif. Tissue Int*. 1997. Vol. 60. P. 405.
7. DeGonza H., Laurenzano S., Galinato J. et al. Metabolic Bone Disease in Pediatric Patients with Short Bowel Syndrome // *Gastrointestinal Disorders*. 2025. С. 123–145. doi: 10.3390/gdisord7010016.
8. Багинский В.А., Денисов С.Д., Солнцева А.В. Точность и эффективность определения костного возраста методом Грейлиха–Пайла у детей Республики Беларусь // *Педиатрия. Восточная Европа*. 2020. Т. 8, № 2. С. 206–217. [Baginskii V.A., Denisov S.D., Solntseva A.V. Accuracy and efficiency of bone age determination by the Greulich–Pyle method in children of the Republic of Belarus. *Pediatrics. Eastern Europe*, 2020, Vol. 8, No. 2, pp. 206–217 (In Russ.)]. doi: 10.34883/PE.2020.8.2.006.

Открыта подписка на 2-е полугодие 2026 года.

Подписной индекс:

«Урал Пресс» (Пресса России) **014023**

НАБЛЮДЕНИЕ ИЗ ПРАКТИКИ / PRACTICAL CASES

УДК 616.71-007.234-055.5/.7-073.75

<http://doi.org/10.22328/2079-5343-2026-17-2-117-122>**ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ СЛОЖНОСТИ ДЕЦИДУАЛИЗИРОВАННОЙ ЭНДОМЕТРИОМЫ ЯИЧНИКА, ИМИТИРУЮЩЕЙ ЗЛОКАЧЕСТВЕННУЮ ОПУХОЛЬ ПРИ БЕРЕМЕННОСТИ: РОЛЬ МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНОЙ ТОМОГРАФИИ С КОНТРАСТНЫМ УСИЛЕНИЕМ: КЛИНИЧЕСКИЙ СЛУЧАЙ**^{1,2}А. И. Тащилкин[✉], ²С. П. Нарзиева[✉], ³Н. В. Марченко[✉], ²А. Н. Тайц[✉], ²И. А. Ершов[✉]¹Детская городская больница № 22, Санкт-Петербург, Россия²Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Санкт-Петербург, Россия³Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Децидуализированные эндометриомы при беременности являются редкой находкой и представляют значительную диагностическую проблему, так как имитируют злокачественные новообразования яичников.

Описан клинический случай пациентки 27 лет на сроке беременности 15 недель с солидно-кистозным образованием левого яичника, выявленным при УЗИ. Для дифференциальной диагностики выполнена магнитно-резонансная томография (МРТ) малого таза с внутривенным контрастированием препаратом гадобутрол (Гадовист) и DWI.

МРТ выявила образование, соответствующее эндометриоме, с внутрисветным солидным узлом (максимальный размер ≈ 22 мм), демонстрирующим умеренное неоднородное контрастное усиление. Критически важным признаком доброкачественности процесса явилось отсутствие значимого ограничения диффузии: измеряемый коэффициент диффузии (ADC) узла составил $1,5-1,8 \times 10^{-3} \text{ мм}^2/\text{с}$. Признаков инвазивного роста, лимфаденопатии или канцероматоза не выявлено.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Комплексная мультипараметрическая МРТ, включающая анализ морфологии образования, кинетики контрастного усиления и, особенно, количественных показателей ADC, является высокоинформативным методом для дифференциальной диагностики децидуализированной эндометриомы и злокачественной опухоли яичника у беременных, что позволяет обосновать выбор консервативной тактики ведения и избежать необоснованного оперативного вмешательства.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: децидуализированная эндометриома, беременность, магнитно-резонансная томография, диффузионно-взвешенная визуализация, ADC, дифференциальная диагностика

* Для корреспонденции: Тащилкин Алексей Иванович, e-mail: radiology@tashchilkin.ru

Для цитирования: Тащилкин А.И., Нарзиева С.П., Марченко Н.В., Тайц А.Н., Ершов И.А. Диагностические сложности децидуализированной эндометриомы яичника, имитирующей злокачественную опухоль при беременности: роль магнитно-резонансной томографии с контрастным усилением: клинический случай // *Лучевая диагностика и терапия*. 2026. Т. 17, № 2. С. 117–122, doi: <http://doi.org/10.22328/2079-5343-2026-17-2-117-122>.

DIAGNOSTIC CHALLENGES OF A DECIDUALIZED OVARIAN ENDOMETRIOMA MIMICKING A MALIGNANT TUMOR DURING PREGNANCY: THE ROLE OF CONTRAST-ENHANCED MAGNETIC RESONANCE IMAGING: A CLINICAL CASE^{1,2}Aleksey I. Tashilkin[✉], ²Sabina P. Narzieva[✉], ³Natalia V. Marchenko[✉], ²Anna N. Tait[✉], ²Ivan A. Ershov[✉]¹Children's City Hospital No. 22, St. Petersburg, Russia²St. Petersburg State Pediatric Medical University, St. Petersburg, Russia³St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

Decidualized endometriomas in pregnancy are a rare finding and pose a significant diagnostic challenge as they mimic malignant ovarian neoplasms. We describe a clinical case of a 27-year-old patient at 15 weeks of gestation with a solid-cystic mass of the left ovary detected on ultrasound. MRI of the pelvis with intravenous contrast enhancement with gadobutrol (Gadovist) and DWI was performed for differential diagnosis. MRI revealed a mass consistent with an endometrioma with an intraluminal solid nodule (height <11 mm) that showed moderate heterogeneous contrast enhancement. A critically important feature was the absence of

significant diffusion restriction: the ADC value of the node was $1.5-1.8 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$. There were no signs of invasive growth, lymphadenopathy, or carcinomatosis.

CONCLUSION: Comprehensive MRI evaluation, including analysis of morphology (nodule height), contrast enhancement kinetics, and especially quantitative ADC values, is a highly informative method for the differential diagnosis of decidualized endometrioma and malignant ovarian tumors in pregnant patients, justifying the choice of conservative tactics and avoiding unjustified surgical intervention.

KEYWORDS: decidualized endometrioma, pregnancy, magnetic resonance imaging, diffusion-weighted imaging, ADC, differential diagnosis

* For correspondence: *Aleksey I. Tashchilkin, e-mail: radiology@tashchilkin.ru*

For citation: Tashilkin A.I., Narzieva S.P., Marchenko N.V., Taits A.N., Ershov I.A. Diagnostic challenges of a decidualized ovarian endometrioma mimicking a malignant tumor during pregnancy: the role of contrast-enhanced magnetic resonance imaging: a clinical case // *Diagnostic radiology and radiotherapy*. 2026. Vol. 17, No. 2. P. 117–122, <http://doi.org/10.22328/2079-5343-2026-17-2-117-122>.

Введение. Обнаружение образований яичников во время беременности требует тщательной дифференциальной диагностики. Децидуализированные эндометриомы, хотя и редки (в мировой литературе описано около 100 случаев), представляют значительную проблему, так как их визуализационные характеристики могут имитировать злокачественные опухоли [1, 2]. Децидуализация эндометриом — редкое, но клинически значимое явление при беременности, характеризующееся трансформацией стромальных клеток эндометриоидных очагов под действием прогестерона. Распространенность оценивается примерно в 12% у беременных с эндометриоидными кистами [3]. Этот процесс приводит к формированию солидных васкуляризированных компонентов, радикально меняющих визуализационную картину и имитирующих злокачественность [4]. С другой стороны, злокачественная трансформация является редким, но часто фатальным осложнением ovarian endometriomas и также может происходить во время беременности [5]. Данный случай иллюстрирует диагностические сложности и представляет первое в отечественной литературе подробное описание применения контрастной МРТ с комплексной оценкой динамики контрастирования и ADC для дифференциальной диагностики децидуализированной эндометриомы.

Клинический случай

Пациентка, 27 лет, 1-я беременность (15 недель). Анамнез: эндометриома левого яичника диагностирована прекоцепционно. В первом триместре отмечен рост образования с появлением атипичных УЗИ-признаков.

Обследование: УЗИ: левый яичник размерами $67 \times 35 \times 65 \text{ мм}$, объем $81,1 \text{ см}^3$, неоднородной эхоструктуры с двумя гипоэхогенными образованиями ($54 \times 35 \times 53,6 \text{ мм}$, объем $51,8 \text{ см}^3$ и $30 \times 17 \times 19 \text{ мм}$). При ЦДК — единичные локусы кровотока по периферии. Заключение: УЗ-признаки кистозно-измененного левого яичника у беременной, нельзя исключить субсерозный узел на серозном основании с нарушением питания.

МРТ-исследование проведено на сроке 15 недель с внутривенным болюсным введением гадобутрола (Гадовист) по строгим показаниям после оценки риска/пользы и оформления информированного согласия.

МРТ-характеристики образования левого яичника:

- размер: $\approx 72 \times 27 \text{ мм}$;
- кистозный компонент: гиперинтенсивный сигнал на T1-взвешенных изображениях (ВИ) и T1-ВИ с подавлением сигнала от жировой ткани (FS), изогиперинтенсивный сигнал на T2-ВИ, что характерно для содержимого эндометриомы («шоколадная киста»);
- солидный компонент: интрапросветный узел ($\approx 23 \times 22 \text{ мм}$; высота в просвете образования менее 11 мм) с гипоинтенсивным сигналом на T1-ВИ (включая FS) и гиперинтенсивным на T2-ВИ;
- DWI/ADC: отсутствие достоверного ограничения диффузии. Коэффициент диффузии (ADC) узла составил $1,5-1,8 \times 10^{-3} \text{ мм}^2/\text{с}$ (что близко к значениям, описанным для децидуализированной ткани ($\approx 1,77 \times 10^{-3} \text{ мм}^2/\text{с}$), и значительно выше значений, типичных для карцином яичников ($\approx 1,13$) [6]).

Контрастное усиление: после введения контрастного вещества и выполнения динамического сканирования, отмечалось умеренное неоднородное постепенное накопление контрастного вещества с усилением МР-сигнала в солидном узле без признаков инвазивного роста и быстрого вымывания препарата.

Заключение МРТ: МР-картина образования левого яичника (O-RADS_3), требующего дифференциальной диагностики между децидуализированной эндометриомой и злокачественной опухолью. Учитывая отсутствие ограничения диффузии, высокий ADC и отсутствие инвазии, данные свидетельствуют в пользу доброкачественного процесса. Лабораторные данные: СА-125 — 44,9 Ед/мл (физиологически повышен), HE4 — в норме.

Правый яичник не изменен. Беременность 15 недель, один плод. Умеренное количество свободной

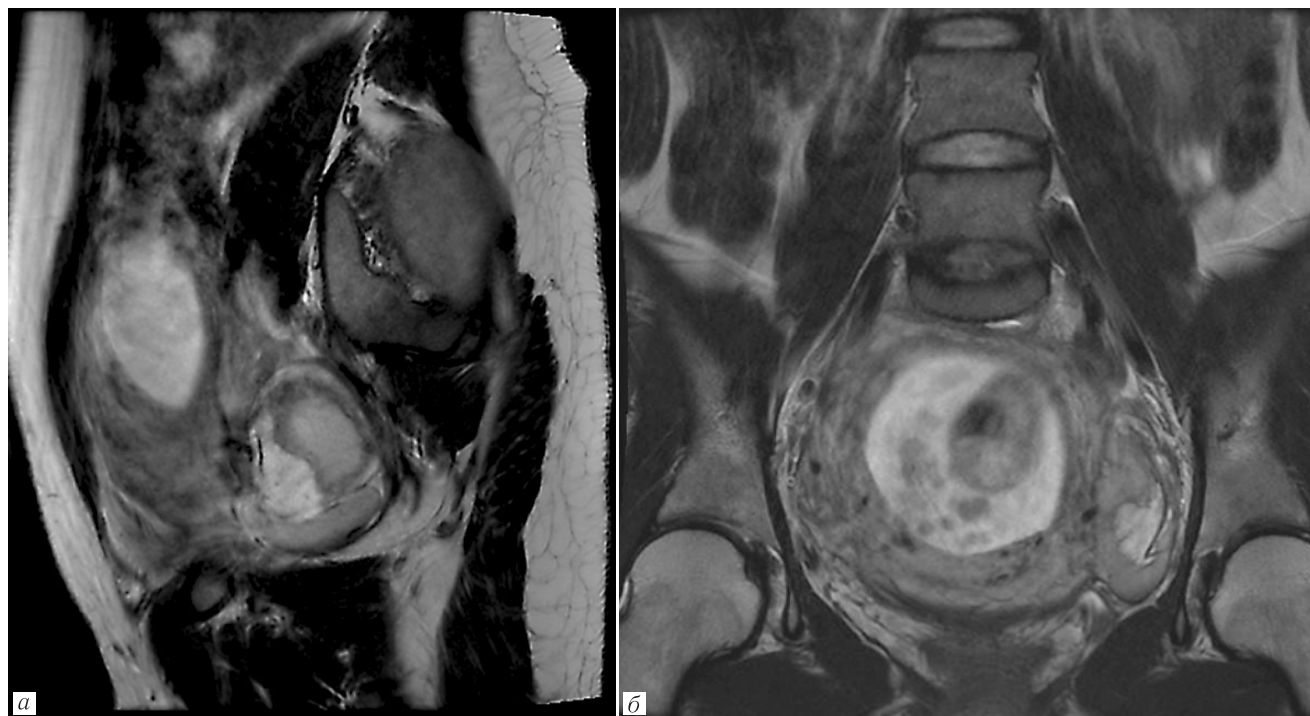


Рис. 1. МРТ малого таза: *а* — Т2-ВИ в сагиттальной плоскости; *б* — Т2-ВИ в корональной плоскости

Fig. 1. MRI of the pelvis: *a* — T2-weighted imaging in the sagittal plane; *б* — T2-weighted imaging in the coronal plane

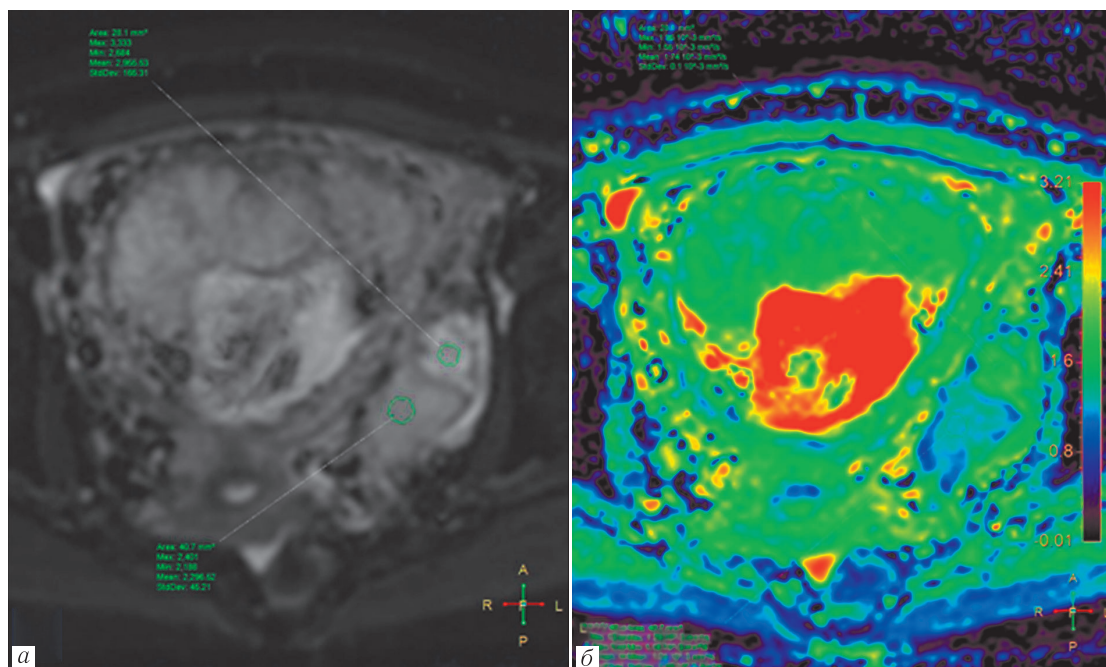


Рис. 2. Диффузионно-взвешенные изображения малого таза указывают на то, что коэффициент диффузии солидного узла в структуре геморрагической кисты составил $1,5-1,8 \times 10^{-3} \text{ мм}^2/\text{с}$: *а* — ДВИ с высоким *b*-фактором (*b*-1000); *б* — ИКД с обозначением коэффициента в области геморрагической кисты и в области солидного узла

Fig. 2. Diffusion-weighted images of the pelvis indicate that the diffusion coefficient of the solid nodule within the hemorrhagic cyst was $1.5-1.8 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$: *a* — DWI with a high *b*-factor (*b*-1000); *б* — ADC with the coefficient marked in the region of the hemorrhagic cyst and in the area of the solid nodule

жидкости. Признаков лимфаденопатии, канцероматоза или метастазов не выявлено.

Дифференциальный диагноз включал: децидуализированную эндометриому, злокачественную опухоль яичника, лютеому беременности. Через две недели выполнена диагностическая лапароскопия с вылуци-

ванием кисты. Макроскопически: капсула кисты толстая, содержимое «шоколадного» вида. Микроскопическое описание: в стенке кисты наблюдаются обширные участки децидуальной трансформации, представленные гипертрофированными эндометриоидными стромальными клетками полигональной

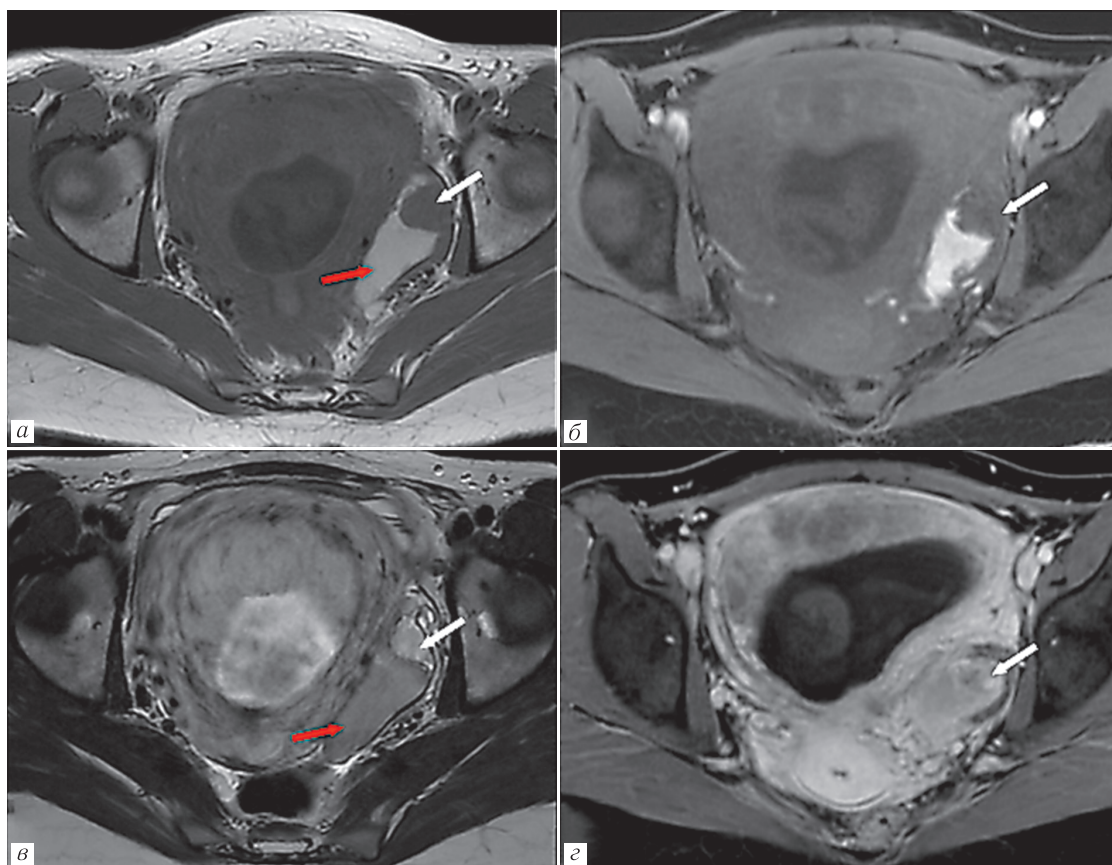


Рис. 3. МРТ малого таза (аксиальные срезы), красной стрелкой указана геморрагическая киста, белой стрелкой указан участок гипоинтенсивного сигнала на всех T1-ВИ и гиперинтенсивного на T2-ВИ в структуре геморрагической кисты: *а* — T1-ВИ без жироподавления; *б* — T1-ВИ с жироподавлением; *в* — T2-ВИ; *г* — постконтрастные T1-ВИ с жироподавлением: отмечается неоднородное накопление контрастного препарата узлом в структуре геморрагической кисты

Fig. 3. MRI of the pelvis (axial slices), with a red arrow indicating a hemorrhagic cyst and a white arrow pointing to an area of hypointense signal on all T1-weighted images and hyperintense signal on T2-weighted images within the structure of the hemorrhagic cyst: *a* — T1-weighted image without fat suppression; *б* — T1-weighted image with fat suppression; *в* — T2-weighted image; *г* — post-contrast T1-weighted images with fat suppression: there is an uneven accumulation of the contrast agent in the structure of the hemorrhagic cyst

формы с обильной эозинофильной цитоплазмой и округлыми ядрами. Митозов нет. Определяются очаги гемосидерофагов и кровоизлияний.

Заключение. Морфологическая картина эндометриоидной кисты яичника с выраженной децидуальной трансформацией стромы.

Обсуждение. Ключевыми диагностическими признаками в пользу децидуализированной эндометриомы в данном случае явились: 1) типичный МР-сигнал кистозного компонента; 2) наличие солидного компонента высотой менее 11 мм [6]; 3) умеренное неоднородное контрастное усиление без быстрого вымывания; 4) отсутствие инвазивного роста и перитонеальных имплантов; 5) наиболее важный признак — отсутствие значимого ограничения диффузии ($ADC = 1,5 - 1,8 \times 10^{-3} \text{ мм}^2/\text{с}$), что значительно выше пороговых значений для злокачественных опухолей яичника (обычно $< 1,0 - 1,2 \times 10^{-3} \text{ мм}^2/\text{с}$) [6, 7].

Важно отметить ограничения МРТ-диагностики. Исследование чувствительно к артефактам движения. Опухоли пограничной злокачественности

или карциномы на ранней стадии могут иметь небольшие солидные компоненты, что делает их неотличимыми от децидуализированной эндометриомы. Как демонстрирует данный случай, характер контрастного усиления узла при децидуализации может частично имитировать таковой при злокачественной трансформации [8, 9]. Учитывая данные МРТ и отсутствие «красных флагов», было рекомендовано консервативное наблюдение.

Крайне важно проводить мультидисциплинарное обсуждение для балансирования рисков для плода и матери [10]. Показанием к оперативному лечению могли бы послужить лишь осложнения или появление явных признаков малигнизации. Окончательная верификация возможна после родов при инволюции децидуализированных изменений [4, 9].

Представленный случай подчеркивает высокую диагностическую ценность комплексного мультипараметрического МРТ-исследования с использованием внутривенного контрастирования и DWI/ADC для неинвазивной дифференциальной диагностики

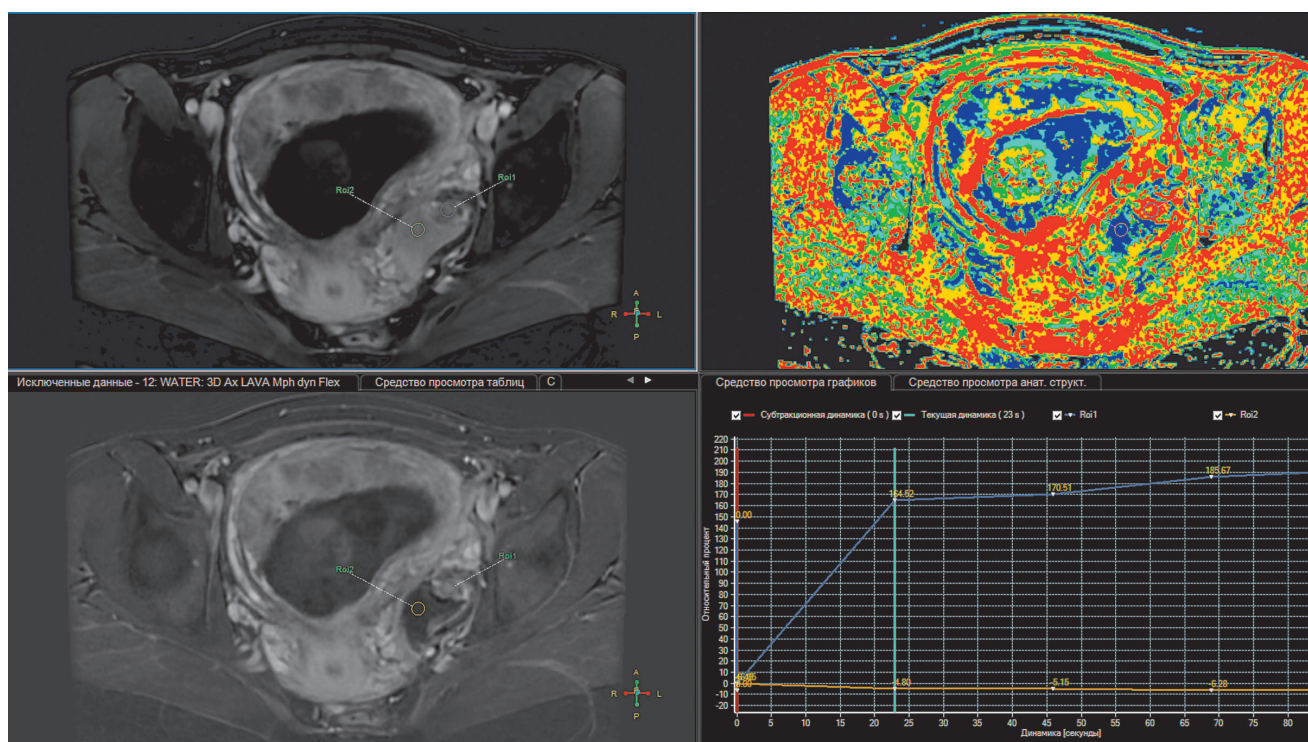


Рис. 4. Постконтрастные динамические T1-ВИ в аксиальной проекции. Кривая динамического контрастного усиления: тип «плато» в узловом компоненте (Roi 1), отсутствие значимого усиления в кистозном компоненте (Roi 2)
Fig. 4. Post-contrast dynamic T1-weighted MRI in axial plane. Dynamic contrast enhancement curve: plateau type in the nodular component (Roi 1), no significant enhancement in the cystic component (Roi 2)

сложных случаев образований яичников у беременных и исключения необоснованных хирургических вмешательств.

Заключение. МРТ с контрастным усилением и оценкой коэффициента диффузии является методом выбора для дифференциальной диагностики децидуализированной эндометриомы и злокачественных опухолей яичника у беременных. Комбинированная оценка морфологических особенностей (высота узла)

и сигнальных характеристик (T1/T2-ВИ, DWI/ADC, кинетика усиления) представляет собой наиболее надежный диагностический алгоритм [6, 10]. Количественная оценка ADC является высокоспецифичным критерием, позволяющим уверенно исключить малигнизацию и выбрать выжидательную тактику ведения беременной пациентки, избежав необоснованного хирургического вмешательства и связанных с ним рисков.

Сведения об авторах:

Тащилин Алексей Иванович — заместитель главного врача по внутреннему контролю качества и безопасности медицинской деятельности, врач-рентгенолог Санкт-Петербургского государственного бюджетного учреждения здравоохранения «Детская городская больница № 22»; 196657, Санкт-Петербург, г. Колпино, Заводской пр., 1; ассистент кафедры медицинской биофизики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 194100, Санкт-Петербург, Литовская ул., д. 2; ORCID 0000-0001-5020-7075;

Нарзиева Сабина Парвизовна — врач-рентгенолог отделения лучевой диагностики с кабинетами КТ федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 194100, Санкт-Петербург, Литовская ул., д. 2; ORCID 0009-0004-6163-6827;

Марченко Наталья Викторовна — доктор медицинских наук, доцент кафедры лучевой диагностики Медицинского института федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»; 199034, Санкт-Петербург, Университетская набережная, д. 7/9; ORCID 0000-0002-2684-9980;

Тайц Анна Николаевна — кандидат медицинских наук, заведующий гинекологическим отделением федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 194100, Санкт-Петербург, Литовская ул., д. 2; ORCID 0000-0001-8285-2917

Ершов Иван Александрович — врач акушер-гинеколог гинекологического отделения федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 194100, Санкт-Петербург, Литовская ул., д. 2; ORCID 0009-0004-4725-8700

Information about the authors:

Aleksey I. Tashchilkin — Assistant Professor at the Department of Medical Biophysics of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «St. Petersburg State Pediatric Medical University»; 194100, St. Petersburg, Litoshskaya St., 2; Deputy Chief Physician for Internal Quality Control and Safety of Medical Activities, Radiologist at the St. Petersburg State Budgetary Healthcare Institution «Children's City Hospital No. 22»; 196657, St. Petersburg, Kolpino, Zavodskoy Ave., 1; ORCID 0000-0001-5020-7075;

Sabina P. Narziyeva — Radiologist at the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «St. Petersburg State Pediatric Medical University»; 194100, St. Petersburg, Litoshskaya St., 2; ORCID 0009-0004-6163-6827;

Natalia V. Marchenko — Dr. of Sci. (Med.), Associate Professor of the Department of Radiation Diagnostics at the Medical Institute of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Saint Petersburg State University»; 199034, Saint Petersburg, Universitetskaya Embankment, 7/9; ORCID 0000-0002-2684-9980;

Anna N. Taitz — Cand. of Sci. (Med.), Head of the Gynecology Department at the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «St. Petersburg State Pediatric Medical University»; 194100, St. Petersburg, Litoshskaya St., 2; ORCID 0000-0001-8285-2917;

Ivan A. Ershov — Obstetrician-Gynecologist at the Gynecology Department of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «St. Petersburg State Pediatric Medical University»; 194100, St. Petersburg, Litoshskaya St., 2; ORCID 0009-0004-4725-8700.

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства, согласно международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распределен следующим образом: концепция и план исследования — *А.И. Тащилкин*; сбор и анализ данных — *С.П. Нарзиева, А.Н. Тайц, И.А. Ершов*; подготовка рукописи — *Н.В. Марченко*.

Authors' contributions. All authors confirm their authorship according to the international ICMJE criteria (all authors made substantial contributions to the conception, research, and preparation of the article, and read and approved the final version before publication). Special contribution: *AIT* aided in the concept and plan of the study; *SPN, ANT, IAE* provided collection and mathematical analysis of data; *NVM*, preparation of the manuscript.

Потенциальный конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Disclosure: the authors declare that they have no competing interests.

Соответствие принципам этики: информированное согласие получено от пациента.

Adherence to ethical standards: informed consent was obtained from patient.

Поступила/Received: 14.10.2025

Принята к печати/Accepted: 29.05.2026

Опубликована/Published: 29.06.2026

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Rozalli F.I., Rahmat K., Fadzli F. et al. Decidualized ovarian endometrioma in a pregnant woman mimicking ovarian malignancy: magnetic resonance imaging and ultrasonographic findings // *Iran J. Radiol.* 2015. Vol. 12, No. 4. P. e21260. doi: 10.5812/iranjradiol.21260.
2. Yin M., Wang T., Li S. et al. Decidualized ovarian endometrioma mimicking malignancy in pregnancy: a case report and literature review // *J. Ovarian. Res.* 2022. Vol. 15, No. 1. P. 33. doi: 10.1186/s13048-022-00966-6.
3. Mureşan A.G. Navigating the nuances: Distinguishing decidual tissue from ovarian tumors in endometrial cases // *ECR.* 2025. Poster No. C-13757. doi: 10.26044/ecr2025/C-13757.
4. Okada H., Tsuzuki T., Murata H. Decidualization of the human endometrium // *Reprod. Med. Biol.* 2018. Vol. 17, No. 3. P. 220–227. doi: 10.1002/rmb2.12088.
5. Leiserowitz G.S., Gumbs J.L., Oi R. et al. Endometriosis-related malignancies // *Int. J. Gynecol. Cancer.* 2003. Vol. 13, No. 4. P. 466–471. doi: 10.1136/ijgc-00009577-200307000-00010.
6. Morisawa N., Kido A., Kataoka M. et al. Magnetic resonance imaging manifestations of decidualized endometriotic cysts: comparative study with ovarian cancers associated with endometriotic cysts // *J. Comput Assist Tomogr.* 2014. Vol. 38, No. 6. P. 879–884. doi: 10.1097/RCT.0000000000000125.
7. Kido A., Himoto Y., Moribata Y. et al. MRI in the Diagnosis of Endometriosis and Related Diseases // *Korean J. Radiol.* 2022. Vol. 23, No. 4. P. 426–445. doi: 10.3348/kjr.2021.0405.
8. Takeuchi M., Matsuzaki K., Nishitani H. Magnetic resonance manifestations of decidualized endometriomas during pregnancy // *J. Comput Assist Tomogr.* 2008. Vol. 32, No. 3. P. 353–355. doi: 10.1097/RCT.0b013e31814c3c6e.
9. Charkhchi P., Butcher M., Macura K.J. Vanishing pelvic mass: Decidualized endometriosis during pregnancy // *Radiol. Case Rep.* 2024. Vol. 19, No. 6. P. 2535–2539. doi: 10.1016/j.radr.2024.03.018.
10. Bookwalter S.N., Sheedy S.P., VanBuren W.A. et al. MRI of endometriosis: A comprehensive review // *Appl. Radiol.* 2019. Vol. 48, No. 5. P. 6–12.

ВОЗМОЖНОСТИ РЕНТГЕНОГРАФИИ В ДИАГНОСТИКЕ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМ ГИПОФОСФАТАЗИИ: КЛИНИЧЕСКИЙ СЛУЧАЙ

¹И. В. Басек[✉], ¹Е. Ю. Гуркина[✉], ¹Л. Г. Константинова[✉], ²С. С. Седова[✉], ¹Е. В. Горбунова[✉]

¹Национальный медицинский исследовательский центр имени В. А. Алмазова, Санкт-Петербург, Россия

²Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет имени академика И. П. Павлова, Санкт-Петербург, Россия

Гипофосфатазия является редким метаболическим заболеванием, характеризующимся мутациями гена *ALPL* и снижением активности тканенеспецифичной щелочной фосфатазы, что приводит к нарушению минерализации костной ткани и зубов. Клинические проявления зависят от возраста дебюта и тяжести заболевания. При тяжелых перинатальных и инфантильных формах отмечаются выраженная гипоминерализация скелета, деформации грудной клетки, дыхательная недостаточность, пиридоксин-зависимые судороги, гиперкальциемия, нефрокальциноз, краниосиностоз и высокий риск летального исхода. В статье описаны характерные рентгенологические признаки различных форм заболевания, проведена дифференциальная диагностика с рахитом. Представлены клинические наблюдения двух пациентов: с перинатальной и детской формой гипофосфатазии, которые были диагностированы с помощью лабораторных, молекулярно-генетических и рентгенологических методов исследования. Отмечено, что правильная интерпретация рентгенологических признаков при разных формах гипофосфатазии может иметь решающее значение для своевременной постановки диагноза, начала терапии и дальнейшего контроля эффективности лечения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гипофосфатазия, тканенеспецифическая щелочная фосфатаза, мутация гена *ALPL*, рентгенография, рахитоподобные заболевания, остеопороз, остеомалиция, псевдопереломы

* Для корреспонденции: Басек Илона Владимировна, e-mail: Ilona.basek@mail.ru

Для цитирования: Басек И.В., Гуркина Е.Ю., Константинова Л.Г., Седова С.С., Горбунова Е.В. Возможности рентгенографии в диагностике различных форм гипофосфатазии: клинический случай // *Лучевая диагностика и терапия*. 2026. Т. 17, № 2. С. 123–132, doi: <http://doi.org/10.22328/2079-5343-2026-17-2-123-132>.

THE ROLE OF RADIOGRAPHY IN THE DIAGNOSIS OF DIFFERENT FORMS OF HYPOPHOSPHATASIA: A CLINICAL CASE

¹Ilona V. Basek[✉], ¹Elena Yu. Gurkina[✉], ¹Larisa G. Konstantinova[✉], ²Sofya S. Sedova[✉],
¹Ekaterina V. Gorbunova[✉]

¹Almazov National Medical Research Centr, St. Petersburg, Russia

²Pavlov First St. Petersburg State Medical University, St. Petersburg, Russia

Hypophosphatasia is a rare metabolic disorder characterized by mutations in the *ALPL* gene and reduced activity of tissue-non-specific alkaline phosphatase, leading to impaired mineralization of bone tissue and teeth. Clinical manifestations depend on the age at onset and the severity of the disease. In the severe perinatal and infantile forms, the following features are observed: marked skeletal hypomineralization, chest wall deformities, respiratory insufficiency, pyridoxine-dependent seizures, hypercalcemia, nephrocalcinosis, craniosynostosis, and a high risk of mortality. This article describes the characteristic radiographic features of various forms of the disease and provides a differential diagnosis with rickets. Clinical observations of two patients — one with the perinatal form and one with the childhood form of hypophosphatasia — are presented; both were diagnosed using laboratory, molecular genetic, and radiographic methods. It is noted that accurate interpretation of radiographic signs in different forms of hypophosphatasia can be crucial for timely diagnosis, initiation of therapy, and subsequent monitoring of treatment efficacy.

KEYWORDS: hypophosphatasia, TNSALP, *ALPL* mutation, radiography, rickets-like disorders, osteoporosis, osteomalacia, pseudofractures

* For correspondence: Ilona V. Basek, e-mail: Ilona.basek@mail.ru

For citation: Basek I.V., Gurkina E.Yu., Konstantinova L.G., Sedova S.S., Gorbunova E.V. The role of radiography in the diagnosis of different forms of hypophosphatasia: a clinical case // *Diagnostic radiology and radiotherapy*. 2026. Vol. 17, No. 2. P. 123–132, <http://doi.org/10.22328/2079-5343-2026-17-2-123-132>.

Введение. Гипофосфатазия (ГФФ) — редкое наследственное прогрессирующее рахитоподобное заболевание, вызванное мутацией в гене *ALPL*, вследствие которой нарушается синтез тканенеспецифической щелочной фосфатазы (ТнЩФ) [1].

К настоящему времени зарегистрировано около 500 мутаций гена *ALPL*, наследуемых либо аутосомно-доминантным, либо рецессивным способом. Для большинства случаев тяжелых форм (летальной перинатальной и инфантильной) характерен аутосомно-рецессивный тип наследования. Спорадические мутации считаются крайне редкими [1, 2].

Большинство дефектов гена *ALPL* представлено миссенс-мутациями, в результате чего снижается активность фермента ТнЩФ. Тяжелые формы ГФФ возникают, как правило, при наличии гомозиготной или компаунд-гетерозиготной мутации в гене *ALPL*. Легкие формы ГФФ возникают вследствие гетерозиготной мутации данного гена.

Впервые заболевание было выделено J. Rathbun в 1948 г, который описал новую скелетную патологию, характеризующуюся необычными клиническими проявлениями, в том числе судорогами и крайне низким уровнем ТнЩФ. В первую очередь активность ТнЩФ необходима для минерализации костей и зубов, а мутации, приводящие к потере ее активности, связаны с гипоминерализацией скелета, приводящей к основным клиническим проявлениям ГФФ [3]. При взаимодействии с ТнЩФ высвободившийся неорганический фосфат соединяется с ионами кальция и образует молекулы гидроксиапатита, формирующего матрикс костной ткани. При нарушении этих процессов снижается содержание гидроксиапатита в костях, что приводит к деминерализации костей, их искривлению, укорочению, переломам, раннему выпадению зубов. Кроме того, накапливающийся в избытке НПФ играет роль сильного ингибитора минерализации костной ткани, что еще больше усугубляет костную патологию [4, 5].

Кальций, не использованный для минерализации костного матрикса, накапливается в крови, что приводит к развитию гиперкальциемии, гиперкальциурии, и, как следствие, к нефрокальцинозу, эктопической кальцификации в связках, суставах, глазах и др. [3].

Гипофосфатазия относится к редким заболеваниям, встречается чаще у представителей европеоидной расы, но может поражать также японцев, коренных американцев, китайцев и латиноамериканцев [6].

Различная степень потери активности ТнЩФ может объяснять разнообразие клинической картины при манифестации заболевания от минимальных проявлений до летальной формы с первыми проявлениями внутриутробно [7].

В европейской популяции легкие формы ГФФ регистрируются с частотой 1:6370, из которых клинически манифестируют лишь 4% случаев, в то время как тяжелые формы встречаются у 1:100 000–1:300 000 живорожденных, за исключением популяций с «эффектом основателя» (провинция Манитоба), где частота достигает 1:2500 [1, 4, 8].

ГФФ характеризуется широкой вариабельностью клинических проявлений и прогноза для пациента — от легкого течения с незначительным поражением костей или изолированным поражением зубочелюстной системы до тяжелых форм с выраженными деформациями скелета, частыми переломами, поражением нервной, дыхательной систем, почек, суставов, приводящим к инвалидизации, а в некоторых случаях и к смерти. Манифестация заболевания может наблюдаться в любом возрасте. Чем раньше начинается заболевание, тем, как правило, тяжелее оно протекает [8, 9].

В зависимости от тяжести течения и возраста манифестации различают несколько форм данного заболевания.

— Перинатальная (перинатальная летальная) форма может быть диагностирована внутриутробно, при ультразвуковом исследовании или сразу после рождения. Клинически проявляется гипоминерализацией костей, тяжелыми деформациями скелета, множественными переломами, возникшими внутриутробно или интранатально, гипоплазией легких, дыхательной недостаточностью, В₆-дефицитными судорогами, очень низкими значениями ТнЩФ. Характеризуется тяжелым течением и высокой летальностью [1, 2, 10].

— Инфантильная форма диагностируется с первых дней после рождения до 6 месяцев. Также отмечается тяжелое течение, выраженная гипоминерализация костной ткани с деформациями скелета, множественные переломы, судороги из-за дефицита активной формы витамина В₆, гиперкальциемия, нефрокальциноз, отставание в физическом и моторном развитии [1, 2, 11].

— При детской форме (развивается в возрасте от 6 мес до 18 лет) рахитоподобные деформации скелета развиваются постепенно, имеют разную степень выраженности. Отмечается задержка физического и моторного развития, боли в костях и мышцах, позднее начало ходьбы, «утиная» походка, переломы «без причины», краниосиностоз, характерно раннее выпадение молочных и постоянных зубов с неповрежденными корнями [1, 2, 11].

— Для взрослой формы характерны псевдопереломы и многократные, медленно консолидирующиеся переломы, хроническая усталость, слабость

мышц, хондрокальциноз, псевдоподагра, артропатии, сопровождающиеся выраженным болевым синдромом, приводящие к нарушению качества жизни и инвалидизации [1, 2].

— При одонтогенной форме единственным проявлением болезни является патология зубов: раннее выпадение зубов с интактным корнем, гипоплазия эмали [1, 2, 12, 13].

Клинические признаки, стойкое снижение уровня щелочной фосфатазы в крови, данные рентгенографии и генетические исследования необходимы для диагностики и контроля терапии ГФФ [14, 15].

Заболевание имеет прогрессивный характер, при отсутствии своевременной диагностики и лечения может сопровождаться развитием тяжелых, инвалидизирующих осложнений, выраженным болевым синдромом, снижением качества жизни, в связи с чем крайне важной задачей является максимально раннее выявление гипофосфатазии и, в частности, визуализация состояния костной ткани [1, 2].

Несмотря на высокую клиническую значимость ранней диагностики, гипофосфатазия до сих пор остается заболеванием с низкой выявляемостью. Характерные рентгенологические признаки нередко остаются нераспознанными, из-за чего пациенты долгое время наблюдаются с диагнозом «витамин-D-дефицитный рахит», «несовершенный остеогенез» или другими диагнозами и своевременно не получают патогенетическую ферментозаместительную терапию [1, 2, 14]. Это обусловлено не только редкостью патологии, но и недостаточной осведомленностью рентгенологов и педиатров о типичных лучевых паттернах ГФФ.

Цель. Демонстрация возможности рентгенографии в диагностике различных форм гипофосфатазии с акцентом на ключевые дифференциально-диагностические критерии, представленные в том числе на примере собственных клинических наблюдений.

Для достижения поставленной цели были определены следующие **задачи**:

1) выделить рентгенографические паттерны, характерные для ГФФ, и позволяющие отличить заболевание от других состояний, сопровождающихся гипоминерализацией скелета;

2) описать рентгенологическую семиотику перинатальной и детской форм ГФФ у двух пациентов;

3) сформулировать «большую пятерку» рентгенографических дифференциально-диагностических различий, доступных для практического применения.

Гипотеза исследования состоит в том, что знание характерных рентгенологических признаков ГФФ (таких как «языки пламени» в метафизах, зоны Лоозера, краниосиностоз, хондрокальциноз) и их принципиальных отличий от рахита позволяет значительно сократить время до постановки диагноза и начала ферментозаместительной терапии, что напрямую влияет на прогноз течения заболевания.

Наиболее информативные методы визуализации костной ткани представлены ниже.

Рентгенография — базовый метод. Рентгеновские снимки длинных костей (плечо, предплечье, бедро, голень) позволяют выявить снижение минерализации костной ткани, псевдопереломы. Рентгеновские снимки крупных суставов (плечевых, локтевых, коленных) необходимы для выявления гипоплазии эпифизов (у детей) и кистовидной перестройки костной структуры метафизов. Рентгенография стоп позволяет выявить стрессовые переломы. На рентгенограммах грудной клетки оцениваются состояние ребер, форма грудной клетки. Снимки черепа показывают минерализацию костной ткани, позволяют выявить краниосиностоз, признаки повышения внутричерепного давления [12, 16].

Компьютерная томография (КТ) в диагностике состояния костной ткани используется реже. Является методом выбора при подозрении на стрессовые переломы, при оценке черепа у младенцев, оценке грудной клетки при перинатальных формах [10].

Магнитно-резонансная томография (МРТ) информативна для раннего выявления стрессовых переломов, оценки отека костного мозга, исключения опухолей/воспалений, если диагноз сомнителен [1].

Денситометрия (DXA) позволяет оценить минеральную плотность костной ткани и качество кости [18, 21]. У детей денситометрическая плотность может быть нормальной, что не исключает наличия заболевания. Важно отметить, что показатели DXA не всегда отражают тяжесть гипофосфатазии.

Ортопантограмма/стоматологическая рентгенография: обязательна при одонтогенной форме заболевания, можно выявить: тонкие корни зубов, гипоцементоз, плохую минерализацию [1, 12, 13].

Характерные рентгенографические изменения костной ткани при гипофосфатазии включают деформации и укорочение трубчатых костей, остеохондральные выросты длинных трубчатых костей — шпоры Боудлера. Также встречается расширение зон роста, неравномерность и расширение метафизов с чередованием участков остеосклероза и остеопороза в виде так называемых «языков пламени», участков просветления костной ткани, которые проецируются от зон роста к диафизам [1, 2].

При исследовании черепа может выявляться гипоминерализация костной ткани (мембранозный череп), краниосиностоз и симптом «пальцевых вдавлений» — признак повышения внутричерепного давления. У пациентов старшего возраста могут определяться хондрокальциноз, псевдопереломы и псевдоподагра [20].

Разные формы гипофосфатазии имеют свои характерные рентгенологические признаки (рентген/КТ).

Перинатальная форма — самые характерные рентгенологические находки: резко сниженная минерализация костей (кости выглядят почти

«прозрачными»), очень тонкие, укороченные длинные кости, внутриутробные переломы, часто множественные, деформации костей (особенно бедренных), широкие V-образные метафизы с неравномерным снижением плотности костной ткани, «расплывчатые» зоны роста, плохое окостенение костей черепа, большие роднички, мембранозный череп («craniotabes»), позднее закрытие большого родничка. Узкая грудная клетка, приводит к гипоплазии легких и дыхательной недостаточности [1, 2, 10].

Инфантильная форма — характерные рентгенологические признаки: генерализованная остеопения (снижение плотности костей), рахитоподобные изменения: чашевидные V-образные метафизы с неравномерным снижением плотности костной ткани, расширением зон роста. Также характерны переломы или псевдопереломы тонких длинных костей, задержка окостенения костей черепа, иногда выраженная, задние отрезки ребер истончены, может быть деформация грудной клетки [1, 2, 12].

Детская форма — наиболее характерные рентгенологические признаки: остеопения умеренной степени. Часто встречаются рахитоподобные изменения скелета, варусные или вальгусные деформации ног, варусная девиация диафизов лучевых костей с формированием подвывиха в локтевых суставах. Определяются зоны функциональной патологической перестройки костной ткани в виде поперечной исчерченности (линии Лоозера). Наблюдаются различные деформации черепа, например, уплощение затылка, широкие швы. Снижена оссификация костей запястья (задержка костного возраста). Отмечается кистовидная перестройка в метафизах и эпифизах, изменение структуры костей по типу «языков пламени», округлой или вытянутой формы; расширение метафизов, разрежение и деформация зон роста (слоистость) [1, 2, 11].

Взрослая форма — самые характерные рентгенологические проявления: стрессовые переломы плюсневых костей стопы (особенно 5-й плюсневой), псевдопереломы (Looser zones) в диафизах бедренных и большеберцовых костей, остеопения или легкая деминерализация, сакральные стрессовые переломы. Возможны хондрокальциноз — отложение кальция в хрящах (более характерно для коленных суставов), спондилоз, дегенеративные изменения позвоночника (неспецифично) [16].

Одонтогенная форма — самые характерные рентгенологические признаки (рентген/ортопантомограмма) касаются изолированно зубочелюстной системы: недостаточная минерализация корней зубов, укороченные корни, отсутствие цемента или его тонкий слой. Характерно раннее выпадение молочных зубов до возраста 5 лет или постоянных зубов, обычно без резорбции корней. Гипоминерализация костной ткани ограничивается альвеолярными отростками, при этом остальная костная ткань челюстей, как правило, не страдает [12, 13].

Клинический пример № 1. Пациент с перинатальной формой гипофосфатазии

У новорожденного при осмотре обращали на себя внимание очень мягкие кости свода черепа, ввиду чего большой родничок не определялся, мягкая грудная клетка, очень тонкие ребра и кости предплечья, аплазия обеих теменных костей, состояние тяжелое. В 1-й день жизни был определен уровень щелочной фосфатазы — 28 Ед/л, на 8-й день жизни — 21 Ед/л. При биохимическом исследовании крови: гиперкальциемия, гиперфосфатемия. По данным КТ и МРТ кости свода черепа полностью не определяются, выявлены ишемические изменения в теменной и затылочной долях левого полушария головного мозга, субарахноидальные кровоизлияния. На рентгенограммах выявлены множественные переломы трубчатых костей верхних и нижних конечностей, ребер (рис. 1–4).



Рис. 1. Рентгенограмма органов грудной клетки ребенка в возрасте 1 месяца в переднезадней проекции.

Грудная клетка узкая. Задние отрезки ребер тонкие, изогнуты («симптом стиральной доски»), деформированы. Концевые отделы тел ребер, углы лопаток и тела позвонков с признаками гипоминерализации

Fig. 1. Chest radiograph of a 1-month-old infant in the anteroposterior (AP) view. The thorax is narrow. The posterior ribs are thin, curved, and deformed, with a «washboard» appearance. The anterior rib ends, scapulae, and vertebral bodies show signs of hypomineralization

При генетическом обследовании выявлена мутация с.302A*G (p.Ala105Val) в гетерозиготном состоянии в гене *ALPL*, ранее не описанная в базах данных. На основании клинико-лабораторных данных поставлен диагноз: гипофосфатазия, перинатальная форма. Начата этиопатогенетическая ферментзаместительная терапия.



Рис. 2. Рентгенограмма нижних конечностей с захватом костей таза в прямой проекции в возрасте 1 месяц. Бедренные кости и кости голеней с варусной ангуляцией, метафизы с признаками остеомалации, проецирующиеся от метафизов к диафизу («симптом языков пламени»). Метаэпифизарные зоны роста бокаловидно расширены, гипоминерализованы. В проксимальной трети левой большеберцовой кости остеохондральный шип (шпора Боудлера). Зоны роста с нечеткостью контуров

Fig. 2. Anteroposterior Radiograph of the lower extremities including the pelvis in a 1-month-old infant. The femurs, tibiae, and fibulae demonstrate varus angulation; the metaphyses show signs of osteomalacia, with flame-shaped radiolucencies extending from the metaphyses into the diaphyses («flame sign»). The growth plates are cup-shaped widened and hypomineralized. An osteochondral spur (Bowdler spur) is present in the proximal third of the left tibia. The growth plates have poorly defined margins

Клинический пример № 2. Пациент с детской формой гипофосфатазии

Ребенок с задержкой физического и психомоторного развития. В 3 года самостоятельно не ходит, сидит с круглой спиной. Отмечается позднее прорезывание зубов, первый зуб появился в возрасте около 1 г 2 мес, через 1,5–2 мес после прорезывания произошло атравматическое выпадение двух зубов, без резорбции корня. В анамнезе частые ОРВИ. Наблюдается ортопедом в связи со сколиозом, кифотической деформацией грудной клетки.

В 2 года на МСКТ выявлен саггитальный и венечный краниосиноз по поводу которого было проведено оперативное лечение. Тогда же обратили внимание на низкий уровень щелочной фосфатазы (11–27 ед/л), рентгенологические признаки гипофосфатазии (рис. 5–7). При ультразвуковом обследовании почек нельзя исключить микролиты.



Рис. 3. Рентгенограммы левой верхней конечности в прямой проекции ребенка в возрасте 1 месяц (а); прицельный снимок левой плечевой кости (б). Отмечаются выраженные нарушения структуры диафизов костей (зоны гипоминерализации чередуются с участками остеосклероза). Метафизы с грубой V-образной деформацией, выраженной остеомалацией. Метафизарные зоны «тюльпанообразной» формы (а, б). В метафизах (проксимальном и дистальном) лучевой кости, а также в средней трети диафиза шпоры Боудлера

Fig. 3. Anteroposterior Radiographs of the left upper extremity of a 1-month-old infant (a); focused view of the left humerus (b). The diaphyses demonstrate marked structural abnormalities (alternating zones of hypomineralization and osteosclerosis). The metaphyses are severely osteomalacic with pronounced V-shaped deformity and a characteristic tulip configuration (a, b). Bowdler spurs are present in the metaphyses (proximal and distal) of the radial bone, as well as in the middle third of the diaphysis

Заподозрена гипофосфатазия. При генетическом исследовании выявлен патогенный вариант гена *ALPL* — с.1300G>A (p.Val434Met) в гомо-/гемизиготном состоянии.

На основании клинико-лабораторных данных поставлен диагноз: гипофосфатазия, детская форма. Начата этиопатогенетическая фермент заместительная терапия.

Обсуждение. С какими заболеваниями необходимо дифференцировать гипофосфатазию? Ключевые

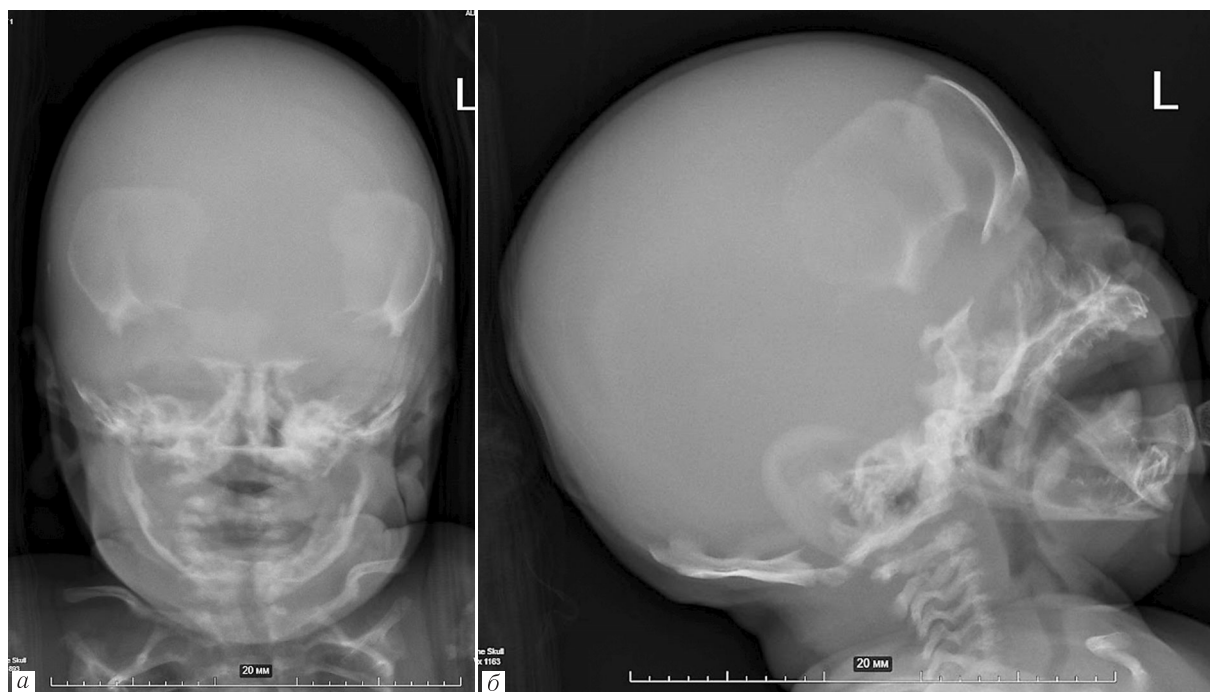


Рис. 4. *a* — Прямая проекция; *б* — левая боковая проекция. На краниограммах визуализируются фрагменты частично оссифицированных лобной, затылочной и височных костей. Остальные кости свода черепа не минерализованы, не дифференцируются, «craniotables» (мембранозный череп)

Fig. 4. *a* — Anteroposterior view; *b* — left lateral view. The craniograms reveal partially ossified fragments of the frontal, occipital, and temporal bones. The others bones of the skullcup are unmineralized, undifferentiated, «craniotables» (membranous skull)



Рис. 5. Рентгенограмма левой верхней конечности в боковой проекции ребенка в возрасте 2,5 года.

Отмечается снижение плотности костной ткани длинных трубчатых костей, расширение и разрыхление зон роста плечевой и лучевой костей

Fig. 5. Radiograph of the left upper extremity in the lateral view of a 2.5-year-old child. There is decreased bone density in the long tubular bones, with widening and fraying of the growth plates of the humerus and radius

рентгенологические «маски» гипофосфатазии для дифференциальной диагностики: рахит всех типов,



Рис. 6. Рентгенограмма правой кисти в прямой проекции ребенка в возрасте 2,5 года. Отмечается гипоминерализация коротких трубчатых костей. Костный возраст соответствует 20–24 мес

Fig. 6. Anteroposterior radiograph of the right hand of a 2.5-year-old child. Hypomineralization of the short tubular bones is observed. Bone age corresponds to 20–24 months

остеомаляция, несовершенный остеогенез, метафизарные дисплазии, хондродисплазии, метаболическая остеопатия недоношенных, эндокринные нарушения минерализации (врожденный гипотиреоз), токсическая или ятрогенная остеомаляция [12, 18].

Одно из основных заболеваний, с которым необходимо проводить дифференциальный диагноз — это витамин D-дефицитный рахит [12, 21]. Ниже представлена таблица различий.

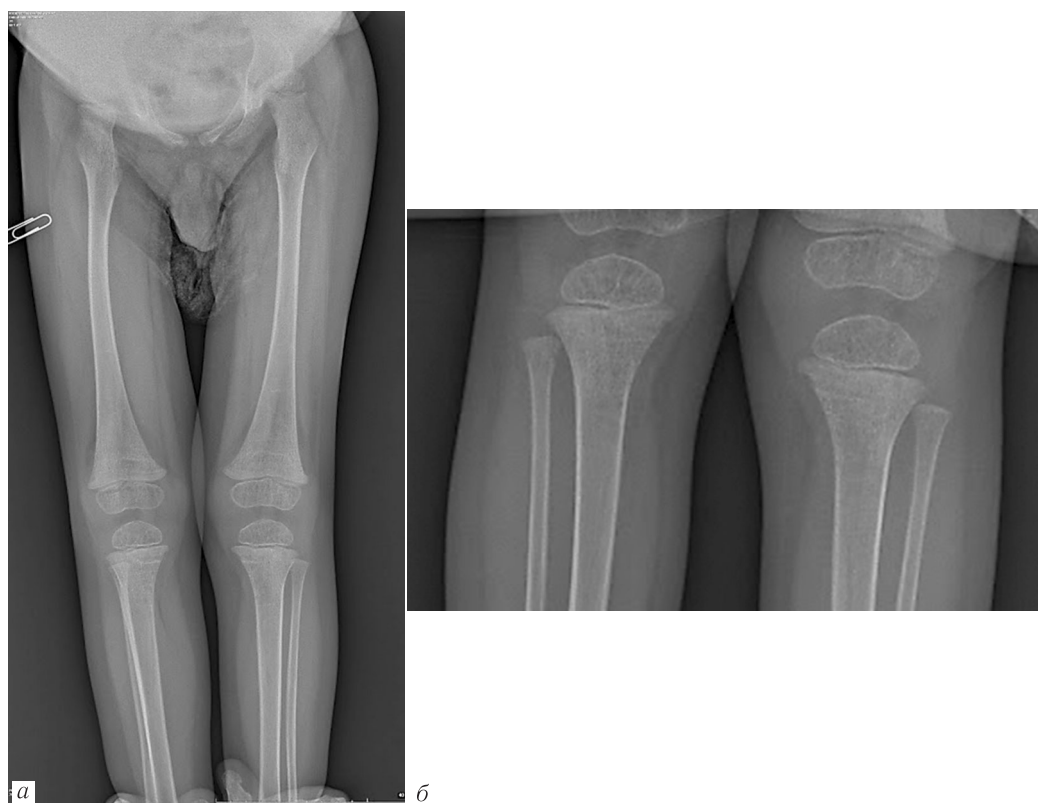


Рис. 7. Рентгенограммы нижних конечностей в прямой проекции ребенка 2,5 года (а, б). Отмечается нарушение минерализации костной ткани эпифизов и метафизов. Метаэпифизарные зоны расширены и разрыхлены. В эпифизах формируется кистовидная дегенерация. В проксимальных метафизах большеберцовых костей отмечается поперечная исчерченность. При оценке тазобедренных суставов: шейки бедренных костей широкие, с обеих сторон увеличен шейечно-диафизарный угол (*coxa valga*). Нарушена целостность шейки правого бедра (патологический перелом)

Fig. 7. Anteroposterior radiographs of the lower extremities of a 2.5-year-old child (а, б). Impaired mineralization of the epiphyseal and metaphyseal bone tissue is observed. The metaepiphyseal regions are widened and show decreased structural density. Cystic degeneration is forming within the epiphyses. Transverse striations are noted in the proximal metaphyses of the tibiae. Assessment of the hip joints demonstrates widened femoral necks with bilaterally increased femoral neck — shaft angles (*coxa valga*). Cortical disruption of the right femoral neck is present (pathological fracture)

Представленные в таблице критерии были применены при анализе собственных клинических наблюдений. У пациента с перинатальной формой (клинический пример № 1) помимо резкой гипоминерализации, «мембранозного черепа» и множественных переломов обращало на себя внимание отсутствие характерных рахитических изменений ребер и диффузной бахромчатости метафизов, что в сочетании с крайне низкой активностью щелочной фосфатазы (21–28 Ед/л) позволило с высокой вероятностью заподозрить именно ГФФ, а не витамин-D-дефицитное состояние. У пациента с детской формой (клинический пример № 2) ключевым дифференциальным отличием являлся выявленный краниосиностоз, характерная кистовидная перестройка метафизов. В обоих случаях низкий уровень щелочной фосфатазы служил решающим лабораторным признаком для установления диагноза ГФФ.

Таким образом, полученные нами данные подтверждают, что знание характерных рентгенологических признаков ГФФ и их принципиальных отличий от рахита действительно позволяет значительно сократить диагностический путь и своевременно

инициировать ферментозаместительную терапию. В обоих описанных случаях именно целенаправленный поиск этих признаков после обнаружения низкого содержания ЩФ привел к постановке верного диагноза в ранние сроки.

Следует подчеркнуть, что рентгенография является лишь одним из элементов диагностического комплекса, однако ее роль трудно переоценить, особенно на этапе скрининга. Дополнительные методы (КТ, МРТ) уточняли состояние черепа и головного мозга, а денситометрия, выполненная в ряде случаев, не всегда коррелировала с тяжестью поражения, что согласуется с литературными данными [18,21]. Дальнейшее накопление данных и сопоставление с исходами терапии позволят уточнить место лучевых методов в мониторинге минерализации костной ткани при ГФФ.

Заключение. Рентгенография остается базовым, повсеместно доступным и высокоинформативным методом диагностики гипофосфатазии, позволяющим выявить характерные изменения структуры и плотности костей. Как показало настоящее наблюдение, целенаправленный анализ рентгенограмм с учетом специфических паттернов в сочетании

Таблица

Гипофосфатазия и витамин D-дефицитный рахит — рентгенологическое сравнение. Рентгенологическая «большая пятерка» различий

Table

Hypophosphatasia and vitamin D deficiency rickets: a radiological comparison. The radiological «Big Five» differences

Признак	Гипофосфатазия	Рахит
Минерализация костей	Снижена, иногда резко — «пустоты» или «языки пламени»	Снижена (диффузно, пропорционально)
Метафизы	Расширение, но менее выраженное; «чащеобразность» умеренная	Очень выраженное расширение и расплывчатость, «бахромчатость» контуров метафизов
Псевдопереломы (Looser zones)	Часто, особенно при взрослых формах	Бывают редко, только при тяжелом, длительном рахите
Окостенение черепа	Задержка окостенения, большие роднички, craniotabes	Также задержка, но обычно без критического дефицита минерализации
Дополнительные признаки	Хондрокальциноз, стресс-переломы плюсневых костей (при взрослых формах)	«Четки на ребрах», деформации грудной клетки

с клинко-лабораторными данными, прежде всего с определением активности щелочной фосфатазы, дает возможность своевременно заподозрить заболевание, провести дифференциальную диагностику и обосновать необходимость молекулярно-генетического исследования. Предложенная в работе рентгенографическая «большая пятерка» различий между ГФФ и рахитом является простым практическим инструментом, который может использоваться рентгенологами и педиатрами в рутинной клинической практике.

Гипофосфатазия — редкое, но в настоящее время поддающееся лечению заболевание с типичными и менее типичными рентгенологическими проявлениями, знание которых необходимо для ускорения постановки диагноза. С появлением ферментозаместительной терапии ранняя диагностика приобрела ключевую роль, поскольку своевременно начатое лечение способно существенно улучшить прогноз и качество жизни пациентов, а лучевая визуализация становится не только методом выявления, но и инструментом объективной оценки эффективности проводимой терапии.

Сведения об авторах:

Басек Илона Владимировна — кандидат медицинских наук, доцент, врач-рентгенолог, заведующая отделом лучевой диагностики, доцент кафедры лучевой диагностики и медицинской визуализации с клиникой федерального государственного бюджетного учреждения «Научный медицинский исследовательский центр имени В. А. Алмазова» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 197349, Санкт-Петербург, ул. Аккуратова, д. 2; e-mail: Ilona.basek@mail.ru; ORCID 0000-0003-4442-7228;

Гуркина Елена Юрьевна — кандидат медицинских наук, врач-педиатр, врач-детский эндокринолог, заместитель главного врача по лечебной работе Клиники материнства и детства федерального государственного бюджетного учреждения «Научный медицинский исследовательский центр имени В. А. Алмазова» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 197349, Санкт-Петербург, ул. Аккуратова, д. 2; e-mail: Gurkina_EYu@almazovcentre.ru; ORCID 0000-0002-5797-8611;

Константинова Лариса Геннадьевна — кандидат медицинских наук врач-рентгенолог, заведующая рентгеновским кабинетом Перинатального центра, ассистент кафедры лучевой диагностики и медицинской визуализации с клиникой федерального государственного бюджетного учреждения «Научный медицинский исследовательский центр имени В. А. Алмазова» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 197349, Санкт-Петербург, ул. Аккуратова, д. 2; e-mail: konstantinova_lg@almazovcentre.ru; ORCID 0000-0003-2947-8158;

Седова Софья Сергеевна — студент лечебного факультета федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет имени академика И. П. Павлова» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 197022, Санкт-Петербург, ул. Льва Толстого, д. 6-8; e-mail: sofandorina@yandex.ru; ORCID 0009-0008-3946-7720;

Горбунова Екатерина Вячеславовна — врач-рентгенолог отделения лучевой диагностики № 3 федерального государственного бюджетного учреждения «Научный медицинский исследовательский центр имени В. А. Алмазова» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 197349, Санкт-Петербург, ул. Аккуратова, д. 2; e-mail: rina-mult@yandex.ru; ORCID 0009-0000-1464-9271;

Information about the authors:

Ilona V. Basek — Cand. of Sci. (Med.), Associate Professor of the Radiology and Medical Imaging Department with a Clinic, the Head of the Radiology Department Almazov National Medical Research Centre; 197349, St. Petersburg, Akkuratov St., 2; e-mail: Ilona.basek@mail.ru; ORCID 0000-0003-4442-7228;

Elena Yu. Gurkina — Cand. of Sci. (Med.), Pediatrician, Pediatric Endocrinologist, Deputy Chief Physician for Medical Work, Maternity and Childhood Clinic, Almazov National Medical Research Centre of the Ministry of Health of Russia; 197349, St. Petersburg, Akkuratov St., 2; e-mail: Gurkina_EYu@almazovcentre.ru; ORCID 0000-0002-5797-8611;

Larisa G. Konstantinova — Cand. of Sci. (Med.), Radiologist, Head of the X-Ray Department at the Perinatal Center, Assistant Professor at the Department of Radiation Diagnostics and Medical Imaging with a Clinic; 197349, St. Petersburg, Akkuratov St., 2; e-mail: konstantinova_lg@almazovcentre.ru; ORCID 0000-0003-2947-8158;

Sofya S. Sedova — Student of the Medical Faculty of the Pavlov First Saint Petersburg State Medical University; 197022, St. Petersburg, L'va Tolstogo St., 6-8; e-mail: sofandorina@yandex.ru; ORCID 0009-0008-3946-7720;

Ekaterina V. Gorbunova — Radiologist, Department of Radiology № 3, Almazov National Medical Research Centre; 197349, St. Petersburg, Akkuratov St., 2;
e-mail: rina-mult@yandex.ru; ORCID 0009–0000–1464–9271;

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства, согласно международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распределен следующим образом: концепция и план исследования — *И.В. Басек, Е.Ю. Гуркина*; сбор и анализ данных — *И.В. Басек, Л.Г. Константинова, Е.В. Горбунова*; подготовка рукописи — *Л.Г. Константинова, Е.Ю. Гуркина, С.С. Седова*.

Authors' contributions. All authors confirm their authorship according to the international ICMJE criteria (all authors made substantial contributions to the conception, research, and preparation of the article, and read and approved the final version before publication). Special contribution: *IVB, EYuG* — aided in the concept and plan of the study; *IVB, LGK, EVG* — provided collection and analysis of data; *LGK, EYuG SSS* — preparation of the manuscript.

Соответствие принципам этики: получено информированное согласие пациентов.

Adherence to ethical standards: informed consent is obtained of the patients.

Потенциальный конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Disclosure: the authors declare that they have no competing interests.

Поступила/Received: 09.02.2026

Принята к печати/Accepted: 29.05.2026

Опубликована/Published: 29.06.2026

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Whyte M.P. Hypophosphatasia —, nosology, pathogenesis, diagnosis and treatment // *Nature Reviews Endocrinology*. 2016. Vol. 12, No. 4. P. 233–246. doi: 10.1038/nrendo.2016.14
- Mornet E. Hypophosphatasia // *Metabolism: clinical and experimental*. 2018. Vol. 82. P. 142–155. doi: 10.1016/j.metabol.2017.08.013.
- Salles J.P. Hypophosphatasia: Biological and Clinical Aspects, Avenues for Therapy // *The Clinical biochemist. Reviews*. 2020. Vol. 41, No. 1. P. 13–27. doi: 10.33176/AACB-19-00031.
- Whyte M.P. Hypophosphatasia: Enzyme Replacement Therapy Brings New Opportunities and New Challenges // *Journal of bone and mineral research: the official journal of the American Society for Bone and Mineral Research*. 2017. Vol. 32, No. 4. P. 667–675. doi: 10.1002/jbmr.3075.
- Kishnani P.S., Rush E.T., Arundel P. et al. Monitoring guidance for patients with hypophosphatasia treated with asfotase alfa // *Molecular genetics and metabolism*. 2017. Vol. 122, No. 1–2. P. 4–17. doi: 10.1016/j.ymgme.2017.07.010.
- Khan A.A., Brandi M.L., Rush E.T. et al. Hypophosphatasia diagnosis: current state of the art and proposed diagnostic criteria for children and adults // *Osteoporos Int*. 2024. Vol. 35, No. 3. P. 431–438. doi: 10.1007/s00198-023-06844-1.
- Mornet E., Taillandier A., Domingues C. et al. Hypophosphatasia: a genetic-based nosology and new insights in genotype-phenotype correlation // *Eur. J. Hum. Genet*. 2021. Vol. 29, No. 2. P. 289–299. doi: 10.1038/s41431-020-00732-6.
- García-Fontana C., Villa-Suárez J.M., Andújar-Vera F. et al. Epidemiological, Clinical and Genetic Study of Hypophosphatasia in A Spanish Population: Identification of Two Novel Mutations in The Alpl Gene // *Sci Rep*. 2019. Vol. 9, No. 1. P. 9569. doi: 10.1038/s41598-019-46004-2.
- Гуркина Е.Ю., Воинова В.Ю., Кузенкова Л.М. и др. Гипофосфатазия. Обзор клинических случаев, опубликованных в РФ // *РМЖ*. 2021. Т. 29, № 2. С. 42–48.— EDN WBTQRR. [Gurkina E.Yu., Voinova V.Yu., Kuzenkova L.M. et al. Hypophosphatasia: A Review of Published Clinical Cases in the Russian Federation. *RMJ*, 2021, Vol. 29, No. 2, pp. 42–48].— EDN WBTQRR.
- Offiah A.C. et al. Differential diagnosis of perinatal hypophosphatasia: radiologic perspectives // *Pediatric radiology*. 2019. Vol. 49, No. 1. P. 3–22. doi:10.1007/s00247-018-4239-0
- Im Minji, Sung Yoon Cho. Hypophosphatasia in childhood: Diagnosis to management // *Osteoporosis and sarcopenia*. 2025. Vol. 11, No. 2. P. 38–42. doi: 10.1016/j.jafos.2025.05.003.
- Wölfel E.M., von Kroge S., Matthies L. et al. Effects of Infantile Hypophosphatasia on Human Dental Tissue // *Calcif Tissue Int*. 2023. Mar; Vol. 112, No. 3. P. 308–319. doi: 10.1007/s00223-022-01041-4.
- Jørgensen F.F., Hermann X., Hepp N., Sonnesen L. Oro-Dental Characteristics in Patients with Adult-Onset Hypophosphatasia Compared to a Healthy Control Group—A Case-Control Study // *J. Oral Rehabil*. 2025. Vol. 52, No. 1. P. 64–74. doi: 10.1111/joor.13878.
- Araci M.B., Akgun B., Atik T. et al. Clinical and molecular findings in children and young adults with persistent low alkaline phosphatase concentrations // *Ann. Clin. Biochem*. 2021. Vol. 58, No. 4. P. 335–341. doi: 10.1177/00045632211000102.
- Seefried L., Genest F., Hofmann C. et al. Diagnosis and Treatment of Hypophosphatasia // *Calcif. Tissue Int*. 2025. Vol. 116, No. 1. P. 46. doi: 10.1007/s00223-025-01356-y.
- Schmidt T. et al. Clinical, radiographic and biochemical characteristics of adult hypophosphatasia // *Osteoporosis international: a journal established as result of cooperation between the European Foundation for Osteoporosis and the National Osteoporosis Foundation of the USA*. 2015. Vol. 28, No. 9. P. 2653–2662. doi: 10.1007/s00198-017-4087-z.
- Genest F., Clauben L., Rak D. et al. Bone mineral density and fracture risk in adult patients with hypophosphatasia // *Osteoporos Int*. 2021. Vol. 32. P. 377–385. doi: 10.1007/s00198-020-05612-9.

18. Мельникова Е.А., Сотникова Е.А., Панунцева К.К. Денситометрия пациентов детского возраста в многопрофильном стационаре. Визуализация в медицине. 2024. Т. 6, № 4. С. 20–25. [Melnikova E.A., Sotnikova E.A., Panuntseva K.K. Densitometry of Pediatric Patients in a Multidisciplinary Hospital. *Visualization in Medicine*, 2024. Vol. 6, No. 4. pp. 20–25.]. doi:10.56871/ViM.2024.10.51.003.
19. Michigami T. et al. Clinical Practice Guidelines for Hypophosphatasia // *Clinical pediatric endocrinology: case reports and clinical investigations: official journal of the Japanese Society for Pediatric Endocrinology*. 2020. Vol. 29, No. 1. P. 9–24. doi: 10.1297/cpe.29.9.
20. Баранов А.А., Батышева Т.Т., Быкова О.В. и др. Современные подходы к ведению детей с гипофосфатазией // *Педиатрическая фармакология*. 2023. Т. 20, № 4. С. 318–336. [Baranov A.A., Batysheva T.T., Bykova O.V. et al. Modern Approaches to the Management of Children with Hypophosphatasia. *Pediatric Pharmacology*, 2023, Vol. 20, No. 4, pp. 318–336 (In Russ.)]. doi: 10.15690/pf.v20i4.2601.
21. Martel-Villagrán J., Arias-Medina A., García-Mardones G. Usefulness of X-rays in the Differential Diagnosis of Hypophosphataemic Rickets // *Advances in Therapy*. 2020. Vol. 37 (S2). P. 89–94. doi: 10.1007/s12325-019-01183-2.

Мы рады всем Вашим статьям, представленным в наш журнал!

Редакция оставляет за собой право сокращения и стилистической правки текста без дополнительных согласований с авторами.

Мнение редакции может не совпадать с точкой зрения авторов опубликованных материалов.

Редакция не несет ответственности за последствия, связанные с неправильным использованием информации.

Корректор: Т. В. Руксина
Верстка: ИП «Ершов К. К.»