



ЦЕНТР ДИАГНОСТИКИ
И ТЕЛЕМЕДИЦИНЫ

ISSN 2712-8490 (Print)
ISSN 2712-8962 (Online)

DIGITAL DIAGNOSTICS

Рецензируемый научный медицинский журнал

4 Том | Volume 3 Выпуск | Issue

2023



ЭКО • ВЕКТОР

<https://journals.eco-vector.com/DD>

УЧРЕДИТЕЛИ

- ГБУЗ «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий ДЗМ»
- ООО «Эко-Вектор»

Свидетельство о регистрации СМИ ПИ
№ ФС 77 - 74099 от 19.10.2018

ИЗДАТЕЛЬ

ООО «Эко-Вектор»
Адрес: 191186, Санкт-Петербург, Аптекарский
переулок, д. 3, литера А, помещение 1Н
E-mail: info@eco-vector.com
WEB: <https://eco-vector.com>

РЕКЛАМА

Отдел рекламы
Тел.: +7 (968) 545 78 20
E-mail: adv2@eco-vector.com

РЕДАКЦИЯ

Зав. редакцией
Елена Андреевна Филиппова
E-mail: ddjournal@eco-vector.com
Тел.: +7 (965) 012 70 72
Адрес: 127051, Москва, ул. Петровка,
д. 24, стр. 1

ПОДПИСКА

Подписка на печатную версию через интернет:
www.journals.eco-vector.com/
www.akc.ru
www.pressa-rf.ru

OPEN ACCESS

В электронном виде журнал распространяется
бесплатно —
в режиме немедленного открытого доступа

ИНДЕКСАЦИЯ

- SCOPUS
- РИНЦ
- Google Scholar
- Ulrich's International Periodicals Directory
- WorldCat

Оригинал-макет

подготовлен в издательстве «Эко-Вектор».
Литературный редактор: *М.Н. Шошина*
Корректор: *М.Н. Шошина*
Вёрстка: *Ф.А. Игнащенко*
Обложка: *Е.Д. Бугаенко*

Сдано в набор 04.09.2023.
Подписано в печать 12.09.2023. Формат 60 × 88%.
Печать офсетная. Печ. л. 25,5. Усл. печ. л. 23,7.
Уч.-изд. л. 13,9. Тираж 5000 экз. Заказ 3-7813-IV.
Цена свободная.

Отпечатано в ООО «Типография Фурсова».
196105, Санкт-Петербург, ул. Благодатная, 69.
Тел.: +7 (812) 646-33-77



© ООО «Эко-Вектор», 2023

ISSN 2712-8490 (Print)
ISSN 2712-8962 (Online)

Digital Diagnostics

Том 4 | Выпуск 3 | 2023

ЕЖЕКВАРТАЛЬНЫЙ РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ НАУЧНЫЙ
МЕДИЦИНСКИЙ ЖУРНАЛ

Главный редактор

Синицын Валентин Евгеньевич, д.м.н., профессор (Москва, Россия)
ORCID: 0000-0002-5649-2193

Заместитель главного редактора

Васильев Юрий Александрович, к.м.н., (Москва, Россия)
ORCID: 0000-0002-0208-5218

Научный редактор

Березовская Татьяна Павловна, д.м.н., профессор (Обнинск, Россия)
ORCID: 0000-0002-3549-4499

Ответственный секретарь

Виноградова Ирина Александровна, к.т.н. (Москва, Россия)
ORCID: 0000-0001-6465-4132

Редакционная коллегия

Berlin L., профессор (Иллинойс, США)
ORCID: 0000-0002-0717-0307

Беляев М.Г., к.ф.-м.н. (Москва, Россия)
ORCID: 0000-0001-9906-6453

Важенина Д.А., д.м.н., доцент (Москва, Россия)
ORCID: 0000-0002-6236-709X

Bisdas S., MBBS, MD, PhD (Лондон, Великобритания)
ORCID: 0000-0001-9930-5549

Гомболевский В.А., к.м.н. (Москва, Россия)
ORCID: 0000-0003-1816-1315

Доможирова А.С., д.м.н., доцент (Москва, Россия)
ORCID: 0000-0003-0806-3164

Frija G., профессор (Париж, Франция)
ORCID: 0000-0003-0415-0586

Guglielmi G., MD, профессор (Фоджа, Италия)
ORCID: 0000-0002-4325-8330

Holodny A., д.м.н. (Нью-Йорк, США)
ORCID: 0000-0002-1159-2705

Лебедев Г.С., д.т.н., профессор (Москва, Россия)
ORCID: 0000-0002-4289-2102

Li H., MD, профессор (Пекин, КНР)

Mannelli L., MD (Нью-Йорк, США)
ORCID: 0000-0002-9102-4176

Матвеев И.А., д.т.н. (Москва, Россия)
ORCID: 0000-0003-2005-9467

Мацкеллишвили С.Т., д.м.н., профессор (Москва, Россия)
ORCID: 0000-0002-5670-167X

Митков В.В., д.м.н., профессор (Санкт-Петербург, Россия)
ORCID: 0000-0003-1959-9618

Морозов С.П., д.м.н., профессор (Москва, Россия)
ORCID: 0000-0001-6545-6170

Neri E., д.м.н. (Пиза, Италия)
ORCID: 0000-0001-7950-4559

Омельяновский В.В., д.м.н., профессор (Москва, Россия)
ORCID: 0000-0003-1581-0703

Омельянская О.В., (Москва, Россия)
ORCID: 0000-0002-0245-4431

Van Ooijen P., к.м.н. (Гронинген, Нидерланды)
ORCID: 0000-0002-8995-1210

Oudkerk M., профессор (Гронинген, Нидерланды)
ORCID: 0000-0003-2800-4110

Ros P.R., MD, MPH, PhD, профессор (Нью-Йорк, США)
ORCID: 0000-0003-3974-0797

Rovira A., профессор (Барселона, Испания)
ORCID: 0000-0002-2132-6750

Решетников Р.В., к.ф.-м.н., (Москва, Россия)
ORCID: 0000-0002-9661-0254

Румянцев П.О., д.м.н. (Москва, Россия)
ORCID: 0000-0002-7721-634X

Храмов А.Е., докт.ф.-м.н., профессор (Санкт-Петербург, Россия)
ORCID: 0000-0003-2787-2530

Аншелес А.А., д.м.н. (Москва, Россия)
ORCID: 0000-0002-2675-3276

Арутюнов Г.П., д.м.н. (Москва, Россия)
ORCID: 0000-0002-6645-2515

Белевский А.С., д.м.н., профессор (Москва, Россия)
ORCID: 0000-0001-6050-724X

Васильева Е.Ю., д.м.н., профессор (Москва, Россия)
ORCID: 0000-0003-4111-0874

Гехт А.Б., д.м.н., профессор (Москва, Россия)
ORCID: 0000-0002-1170-6127

Кобякова О.С., д.м.н., профессор (Москва, Россия)
ORCID: 0000-0003-0098-1403

Кременева Е.И., к.м.н. (Москва, Россия)
ORCID: 0000-0001-9396-6063

Петриков С.С., д.м.н., профессор (Москва, Россия)
ORCID: 0000-0003-3292-8789

Петрайкин А.В., д.м.н., доцент (Москва, Россия)
ORCID: 0000-0002-1694-4682

Проценко Д.Н., к.м.н. (Москва, Россия)
ORCID: 0000-0002-5166-3280

Хатьков И.Е., д.м.н., профессор (Москва, Россия)
ORCID: 0000-0002-4088-8118

Редакция не несет ответственности за содержание рекламных материалов. Точка зрения авторов может не совпадать с мнением редакции. К публикации принимаются только статьи, подготовленные в соответствии с правилами для авторов. Направляя статью в редакцию, авторы принимают условия договора публичной оферты. С правилами для авторов и договором публичной оферты можно ознакомиться на сайте: <https://journals.eco-vector.com/DD/>. Полное или частичное воспроизведение материалов, опубликованных в журнале, допускается только с письменного разрешения издателя — издательства «Эко-Вектор».



FOUNDERS

- Moscow Center for Diagnostics and Telemedicine
- Eco-Vector

PUBLISHER

Eco-Vector

Address: 3 liter A, 1H, Aptekarsky pereulok, 191186, Saint Petersburg, Russian Federation

E-mail: info@eco-vector.com

WEB: <https://eco-vector.com>

ADVERTISE

Adv. department

Phone: +7 (968) 545 78 20

E-mail: adv2@eco-vector.com

EDITORIAL OFFICE

Executive editor

Elena A. Philippova

E-mail: ddjournal@eco-vector.com

Phone: +7 (965) 012 70 72

SUBSCRIPTION

For print version:

www.journals.eco-vector.com/

PUBLICATION ETHICS

Journal's ethic policies are based on:

- ICMJE
- COPE
- ORE
- CSE
- EASE

OPEN ACCESS

Immediate Open Access is mandatory for all published articles

INDEXATION

- SCOPUS
- Russian Science Citation Index
- Google Scholar
- Ulrich's International Periodicals Directory
- WorldCat

TYPESET

complete in Eco-Vector

Copyeditor: *M.N. Shoshina*

Proofreader: *M.N. Shoshina*

Layout editor: *Ph. Ignashchenko*

Cover: *E. Bugaenko*

ISSN 2712-8490 (Print)

ISSN 2712-8962 (Online)

Digital Diagnostics

Volume 4 | Issue 3 | 2023

QUARTERLY PEER-REVIEW MEDICAL JOURNAL

EDITOR-IN-CHIEF

Valentin E. Sinitsyn, MD, Dr.Sci. (Med.), Professor (Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0002-5649-2193

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

Yurii A. Vasilev, MD, Cand.Sci. (Med.) (Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0002-0208-5218

SCIENTIFIC EDITOR

Tatiana P. Berezovskaya MD, Dr.Sci. (Med.), Professor (Obninsk, Russia)

ORCID: 0000-0002-3549-4499

RESPONSIBLE SECRETARY

Irina A. Vinogradova, Cand.Sci. (Tech.) (Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0001-6465-4132

EDITORIAL BOARD

L. Berlin, Professor (Illinois, United States)

ORCID: 0000-0002-0717-0307

M.G. Belyaev, Cand.Sci. (Phys.-Math.), Assistant Professor (Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0001-9906-6453

S. Bisdas, MBBS, MD, PhD (London, United Kingdom)

ORCID: 0000-0001-9930-5549

D.A. Vazhenina, MD, Dr.Sci. (Med.), Associate Professor (Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0002-6236-709X

V.A. Gomboleviskiy, MD, Dr.Sci. (Med.) (Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0003-1816-1315

A.S. Domozhirova, MD, Dr.Sci. (Med.), Associate Professor (Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0003-0806-3164

G. Frija, Professor (Paris, France)

ORCID: 0000-0003-0415-0586

G. Guglielmi, MD, Professor (Foggia, Italy)

ORCID: 0000-0002-4325-8330

A. Holodny, MD (New York, United States)

ORCID: 0000-0002-1159-2705

H. Li, MD, Professor (Beijing, China)

G.S. Lebedev, Dr.Sci. (Tech.), Professor (Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0002-4289-2102

L. Mannelli, MD (New York, United States)

ORCID: 0000-0002-9102-4176

I.A. Matveev, Dr.Sci. (Tech.) (Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0003-2005-9467

S.T. Matskeplishvili, MD, Dr.Sci. (Med.), Professor (Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0002-5670-167X

V.V. Mit'kov, MD, Dr.Sci. (Med.), Professor (Saint Petersburg, Russia)

ORCID: 0000-0003-1959-9618

S.P. Morozov, MD, Dr.Sci. (Med.), Professor (Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0001-6545-6170

E. Neri, MD, Associate Professor (Pisa, Italy)

ORCID: 0000-0001-7950-4559

V.V. Omel'yanovskiy, MD, Dr.Sci. (Med.), Professor (Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0003-1581-0703

D.V. Omelyanskaya, (Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0002-0245-4431

P. van Ooijen, PhD, Associate Professor (Groningen, Netherlands)

ORCID: 0000-0002-8995-1210

M. Oudkerk, Professor (Groningen, Netherlands)

ORCID: 0000-0003-2800-4110

P.R. Ros, MD, MPH, PhD, Professor (New York, United States)

ORCID: 0000-0003-3974-0797

A. Rovira, Professor (Barcelona, Spain)

ORCID: 0000-0002-2132-6750

R.V. Reshetnikov, Cand.Sci. (Phys.-Math.) (Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0002-9661-0254

P.D. Rumyantsev, MD, Dr.Sci. (Med.) (Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0002-7721-634X

A.E. Khamov, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor (Saint Petersburg, Russia)

ORCID: 0000-0003-2787-2530

A.A. Ansheles, MD, Dr.Sci. (Med.)

(Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0002-2675-3276

G.P. Arutyunov, MD, Dr.Sci. (Med.)

(Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0002-6645-2515

A.S. Belevskiy, MD, Dr.Sci. (Med.), Professor

(Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0001-6050-724X

E.Y. Vasilieva, MD, Dr.Sci. (Med.), Professor

(Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0003-4111-0874

A.B. Gekht, MD, Dr.Sci. (Med.), Professor

(Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0002-1170-6127

O.S. Kobayakova, MD, Dr.Sci. (Med.), Professor

(Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0003-0098-1403

E.I. Kremneva, MD, Cand.Sci. (Med.)

(Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0001-9396-6063

S.S. Petrikov, MD, Dr.Sci. (Med.), Professor

(Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0003-3292-8789

A.V. Petryaykin, MD, Dr.Sci. (Med.)

(Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0003-1694-4682

D.N. Protsenko, MD, Cand.Sci. (Med.)

(Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0002-5166-3280

I.E. Khatkov, MD, Dr.Sci. (Med.), Professor

(Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0002-4088-8118

16+

© Eco-Vector, 2023



The editors are not responsible for the content of advertising materials. The point of view of the authors may not coincide with the opinion of the editors. Only articles prepared in accordance with the guidelines are accepted for publication. By sending the article to the editor, the authors accept the terms of the public offer agreement. The guidelines for authors and the public offer agreement can be found on the website: <https://journals.eco-vector.com/DD/>. Full or partial reproduction of materials published in the journal is allowed only with the written permission of the publisher — the Eco-Vector publishing house.

СОДЕРЖАНИЕ

ОРИГИНАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

- Ю.А. Васильев, А.В. Владимирский, О.В. Омелянская, К.М. Арзамасов, С.Ф. Четвериков, Д.А. Румянцев, М.А. Зеленова
Методология тестирования и мониторинга программного обеспечения на основе технологий искусственного интеллекта для медицинской диагностики 252
- А.М. Кабдуллина, В.Е. Сеницын, Р.И. Рахимжанова, Т.Б. Даутов, А.Б. Садуакасова, Б.Б. Калиев, Л.А. Бастарбекова, З.А. Молдаханова
Частота сердечных осложнений у детей, выявленных после радикальной коррекции тетрады Фалло с помощью компьютерной томографии ... 268
- А.С. Максимова, Н.И. Рюмина, Т.А. Шелковникова, О.В. Мочула, Н.Д. Анфиногенова, В.Ю. Усов
Магнитно-резонансная томография сердца у пациентов, переболевших коронавирусной инфекцией (COVID-19) 280
- Ш.Д. Хоссаин, А.В. Петряйкин, А.А. Мураев, А.Б. Данаев, Д.В. Буренчев, А.А. Долгалев, Ю.А. Васильев, Д.Е. Шарова, С.Ю. Иванов
Рентгеноконтрастные шаблоны для определения минеральной плотности кости по данным конусно-лучевой и мультиспиральной компьютерной томографии 292

КЛИНИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

- Т.П. Березовская, Н.А. Рубцова, В.Е. Сеницын, И.В. Зароднюк, Н.В. Нуднов, А.В. Мищенко, Ю.Л. Трубачева, Т.А. Берген, П.Ю. Гришко, С.С. Балясникова, Я.А. Дайнеко, Д.В. Рыжкова, М.М. Ходжибекова, Н.А. Ручьева, И.Е. Тюрин, С.И. Ачкасов, А.А. Невольских, С.С. Гордеев, И.В. Дрошнев
Терминология рака прямой кишки: консенсусное соглашение Рабочей группы экспертов ROPR, AOP и PATRO 306
- А.В. Водоватов, Л.А. Чипига, П.С. Дружинина, И.Г. Шацкий, А.В. Петрякова, С.С. Сарычева, А.М. Библин, Рустам Р. Ахматдинов, Руслан Р. Ахматдинов, Ю.Н. Капырина, А.А. Братилова, И.В. Солдатов, З.А. Лантух, В.Г. Пузырев, С.А. Рыжов
Актуализация формы федерального государственного статистического наблюдения № 3-Д03 «Сведения о дозах облучения пациентов при проведении медицинских рентгенорадиологических исследований»: часть 2 (рекомендации по заполнению формы) 322

СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ОБЗОРЫ

- В.А. Солодкий, Н.В. Нуднов, М.Е. Иванников, Э.С.-А. Шахвалиева, В.М. Сотников, А.Ю. Смыслов
Дозиометрия в анализе медицинских изображений и перспективы её использования в клинической практике 340

НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ

- С.Н. Морозова, В.В. Синькова, Д.А. Гришина, Т.А. Тумилович, А.О. Четкин, М.В. Кротенкова, Н.А. Супонева
Основы стандартной визуализации периферической нервной системы: МР-нейрография 356
- А.И. Щеголев, У.Н. Туманова
Посмертные лучевые исследования в мировом и отечественном здравоохранении: анализ литературы и мнений российских специалистов. 369

КЛИНИЧЕСКИЕ СЛУЧАИ

- И.И. Ярмола, А.В. Аникин, Д.А. Ганькин, Л.Е. Фомина, Н.А. Харитонова, И.С. Жанин, А.А. Пушкин, М.А. Басаргина, О.Б. Кондакова
Магнитно-резонансная томография в диагностике редкого генетического заболевания — недержания пигмента (синдром Блоха—Сульцберга) — на примере клинического случая 384
- Ю.Ф. Шумская, Н.В. Костинова, Д.А. Ахмедзянова, М.М. Сулейманова, Е.В. Фоминых, М.Г. Мнацаканян, Р.В. Решетников
Компьютерная томография в диагностике лихорадки неясного генеза: описание случая 393
- В.А. Заря, П.В. Гаврилов, М.Е. Макогонова, А.Р. Козак, А.А. Вишневатский
Хронический пищеводный свищ как редкая причина вторичного остеомиелита грудного отдела позвоночника 403
- П.В. Свиридов, П.О. Румянцев, М.В. Дегтярев, С.С. Серженко, Д.Б. Санин, С.В. Стыров, Д.Ю. Агибалов, С.В. Корнев
Прецизионная брахитерапия рака предстательной железы под контролем ПСМА-рецепторной молекулярной визуализации 411

ПИСЬМА В РЕДАКЦИЮ

- Н.Д. Кудрявцев, А.В. Петряйкин, Е.С. Ахмад, Ф.А. Киселев, В.В. Бурашов, А.Н. Мухоморова, И.В. Солдатов, А.С. Шкода
Опыт применения мобильного компьютерного томографа в резервном госпитале для лечения пациентов с новой коронавирусной инфекцией COVID-19 427
- С.Ю. Заюнчиковский, С.А. Коновалов, В.В. Зинченко, Д.Е. Шарова, Е.С. Ахмад, А.В. Владимирский
Система менеджмента качества: инструмент развития организации или дополнительная нагрузка? 439

ОШИБКИ

- М.М. Сучилова, И.А. Блохин, О.О. Алешина, В.А. Гомболевский, Р.В. Решетников, В.Ю. Босин, О.В. Омелянская, А.В. Владимирский
Ошибка в статье «Сравнение измерения линейного размера и объёма лёгочных очагов по данным скрининга рака лёгких с помощью низкодозной компьютерной томографии» (doi: 10.17816/DD117481) 448

CONTENTS

ORIGINAL STUDY ARTICLES

- Yuriy A. Vasilev, Anton V. Vladzimirskyy, Olga V. Omelyanskaya, Kirill M. Arzamasov, Sergey F. Chetverikov, Denis A. Rumyantsev, Maria A. Zelenova*
Methodology for testing and monitoring artificial intelligence-based software for medical diagnostics 252
- Azhar M. Kabbullina, Valentin E. Sinitsyn, Raushan I. Rakhimzhanova, Tairkhan B. Dautov, Aigul B. Saduakassova, Bauyrzhan B. Kaliyev, Lyazzat A. Bastarbekova, Zhanar A. Moldakhanova*
Frequency of various cardiac complications in children with repaired tetralogy of Fallot identified by computer tomography 268
- Aleksandra S. Maksimova, Nadezhda I. Ryumshina, Tatiana A. Shelkownikova, Olga V. Mochula, Nina D. Anfinogenova, Wladimir Yu. Ussov*
Cardiac magnetic resonance imaging in patients with history of COVID-19 280
- Shazmim D. Hossain, Alexey V. Petraikin, Alexandr A. Muraev, Aslan B. Danaev, Dmitry V. Burenchev, Alexander A. Dolgalev, Yuriy A. Vasilev, Dariya E. Sharova, Sergey Yu. Ivanov*
Bone mineral density radiopaque templates for cone beam computed tomography and multidetector computed tomography 292

CLINICAL PRACTICE GUIDELINES

- Tatiana P. Berezovskaya, Natalia A. Rubtsova, Valentin E. Sinitsyn, Irina V. Zarodnyuk, Nicolai V. Nudnov, Andrei V. Mishchenko, Yuliya L. Trubacheva, Tatiana A. Bergen, Pavel Yu. Grishko, Svetlana S. Balyasnikova, Yana A. Dayneko, Darya V. Ryjkova, Malika M. Hodzhibekova, Nataliya A. Rucheve, Igor E. Turin, Sergey I. Achkasov, Alexey A. Nevolskikh, Sergey S. Gordeev, Inna V. Droshneva*
Terminology of rectal cancer: consensus agreement of the expert working group 306
- Aleksandr V. Vodovatov, Larisa A. Chipiga, Polina S. Druzhinina, Ilya G. Shatskiy, Anastasiya V. Petryakova, Svetlana S. Sarycheva, Artem M. Biblin, Rustam R. Akhmatdinov, Ruslan R. Akhmatdinov, Yulia N. Kapyrina, Anzhelika A. Bratilova, Ilya V. Soldatov, Zoya A. Lantukh, Victor G. Puzyrev, Sergey A. Ryzhov*
Update of the federal governmental statistical surveillance form № 3-DOZ:
"Data on patient doses from medical X-ray examinations"— Part 2 (FORM completion Recommendations) 322

SYSTEMATICAL REVIEWS

- Vladimir A. Solodkiy, Nikolay V. Nudnov, Mikhail E. Ivannikov, Elina S-A. Shakhvalieva, Vladimir M. Sotnikov, Aleksei Yu. Smyslov*
Dosiomics in the analysis of medical images and prospects for its use in clinical practice 340

REVIEWS

- Sofya N. Morozova, Viktoriya V. Sinkova, Darya A. Grishina, Taisiya A. Tumilovich, Andrey O. Chechetkin, Marina V. Krotenkova, Natalya A. Suponeva*
Conventional magnetic resonance imaging of peripheral nerves: MR-neurography 356
- Aleksandr I. Shchegolev, Ulyana N. Tumanova*
Postmortem radiology studies in global and national healthcare: literature analysis and perspectives of Russian specialists 369

CASE REPORTS

- Igor I. Yarmola, Anatoly V. Anikin, Dmitry A. Gankin, Lyubov E. Fomina, Nataliya A. Kharitonova, Ilya S. Zhanin, Alexander A. Pushkov, Milana A. Basargina, Olga B. Kondakova*
Magnetic resonance imaging for diagnosing a rare disease: incontinencia pigmenti (Bloch–Sulzberger syndrome) on the example of a clinical case 384
- Yuliya F. Shumskaya, Nina V. Kostikova, Dina A. Akhmedzyanova, Maria M. Suleymanova, Ekaterina V. Fominykh, Marina G. Mnatsakanyan, Roman V. Reshetnikov*
Computed tomography in the diagnosis of fever of unknown origin: A case report 393
- Valeriya A. Zarya, Pavel V. Gavrilov, Marina E. Makogonova, Andrey R. Kozak, Arkadiy A. Vishnevskiy*
Chronic esophageal fistula as a rare cause of secondary osteomyelitis of the thoracic spine 403
- Pavel V. Sviridov, Pavel O. Rumiantsev, Mikhail V. Degtyarev, Sergey S. Serzhenko, Dmitry B. Sanin, Sergey V. Styrov, Dmitry Yu. Agibalov, Sergey V. Korenev*
Precision low-dose brachytherapy of prostate cancer under PSMA-receptor molecular visualization 411

LETTERS TO THE EDITOR

- Nikita D. Kudryavtsev, Alexey V. Petraikin, Ekaterina S. Akhmad, Fyodor A. Kiselev, Vyacheslav V. Burashov, Anna N. Mukhortova, Ilya V. Soldatov, Andrey S. Shkoda*
Using a mobile computer tomography scanner in a field hospital setting to manage patients with COVID-19 427
- Sergey Yu. Zayunchkovsky, Sergey A. Kononov, Viktoria V. Zinchenko, Daria E. Sharova, Ekaterina S. Akhmad, Anton V. Vladzimirskyy*
Quality management system: A tool for the development of the organization or an additional burden? 439

CORREGENDUM

- Maria M. Suchilova, Ivan A. Blokhin, Olga O. Aleshina, Victor A. Gombolevskiy, Roman V. Reshetnikov, Viktor Yu. Bosin, Olga V. Omelyanskaya, Anton V. Vladzimirskyy*
Erratum in "Volumetry versus linear diameter lung nodule measurement: an ultra-low-dose computed tomography lung cancer screening study" (doi: 10.17816/DD117481) 448

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD321971>

Методология тестирования и мониторинга программного обеспечения на основе технологий искусственного интеллекта для медицинской диагностики

Ю.А. Васильев, А.В. Владзимирский, О.В. Омелянская, К.М. Арзамасов,
С.Ф. Четвериков, Д.А. Румянцев, М.А. Зеленова

Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий, Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Мировая сумма инвестиций в компании по разработке программного обеспечения на основе технологий искусственного интеллекта для медицинской диагностики составила 80 млн долларов в 2016 году, 152 млн долларов — в 2017 и, ожидаемо, продолжает расти. Активная деятельность компаний-производителей программного обеспечения должна соответствовать существующим клиническим, биоэтическим, правовым и методологическим основам и стандартам. Как на национальном, так и на международном уровне не существует единых стандартов и протоколов проведения испытаний и мониторинга программного обеспечения на основе технологий искусственного интеллекта для медицинской диагностики.

Цель — разработать универсальную методологию тестирования и мониторинга программного обеспечения на основе технологий искусственного интеллекта для медицинской диагностики, направленную на повышение его качества и внедрение в практическое здравоохранение.

Материалы и методы. В ходе аналитического этапа был проведён обзор литературы по базам данных PubMed и eLIBRARY. Практический этап включал апробацию разработанной методологии в рамках Эксперимента по использованию инновационных технологий в области компьютерного зрения для анализа медицинских изображений и дальнейшего применения в системе здравоохранения города Москвы.

Результаты. Разработана методология тестирования и мониторинга программного обеспечения на основе технологий искусственного интеллекта для медицинской диагностики, направленная на повышение качества данного программного обеспечения и его внедрение в практическое здравоохранение. Методология состоит из 7 этапов: самотестирование, функциональное тестирование, калибровочное тестирование, технологический мониторинг, клинический мониторинг, обратная связь и доработка.

Заключение. Отличительными особенностями методологии являются цикличность этапов тестирования, мониторинга и доработки программного обеспечения, приводящие к постоянному повышению его качества, наличие подробных требований к результатам его работы, участие врачей в его оценке. Методология позволит разработчикам программного обеспечения достичь высоких результатов и продемонстрировать достижения в различных направлениях, а пользователям — сделать осознанный и уверенный выбор среди программ, прошедших независимую и всестороннюю проверку качества.

Ключевые слова: программное обеспечение; искусственный интеллект; рентгенология; диагностическая визуализация; методология; контроль качества.

Как цитировать:

Васильев Ю.А., Владзимирский А.В., Омелянская О.В., Арзамасов К.М., Четвериков С.Ф., Румянцев Д.А., Зеленова М.А. Методология тестирования и мониторинга программного обеспечения на основе технологий искусственного интеллекта для медицинской диагностики // *Digital Diagnostics*. 2023. Т. 4, № 3. С. 252–267. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD321971>

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD321971>

Methodology for testing and monitoring artificial intelligence-based software for medical diagnostics

Yuriy A. Vasilev, Anton V. Vladzimirskyy, Olga V. Omelyanskaya, Kirill M. Arzamasov, Sergey F. Chetverikov, Denis A. Rumyantsev, Maria A. Zelenova

Moscow Center for Diagnostics and Telemedicine, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: The global amount of investment in companies developing artificial intelligence (AI)-based software technologies for medical diagnostics reached \$80 million in 2016, rose to \$152 million in 2017, and is expected to continue growing. While software manufacturing companies should comply with existing clinical, bioethical, legal, and methodological frameworks and standards, there is a lack of uniform national and international standards and protocols for testing and monitoring AI-based software.

AIM: This objective of this study is to develop a universal methodology for testing and monitoring AI-based software for medical diagnostics, with the aim of improving its quality and implementing its integration into practical healthcare.

MATERIALS AND METHODS: The research process involved an analytical phase in which a literature review was conducted on the PubMed and eLibrary databases. The practical stage included the approbation of the developed methodology within the framework of an experiment focused on the use of innovative technologies in the field of computer vision to analyze medical images and further application in the health care system of the city of Moscow.

RESULTS: A methodology for testing and monitoring AI-based software for medical diagnostics has been developed, aimed at improving its quality and introducing it into practical healthcare. The methodology consists of seven stages: self-testing, functional testing, calibration testing, technological monitoring, clinical monitoring, feedback, and refinement.

CONCLUSION: Distinctive features of the methodology include its cyclical stages of monitoring and software development, leading to continuous improvement of its quality, the presence of detailed requirements for the results of the software work, and the participation of doctors in software evaluation. The methodology will allow software developers to achieve significant outcomes and demonstrate achievements across various areas. It also empowers users to make informed and confident choices among software options that have passed an independent and comprehensive quality check.

Keywords: software; artificial intelligence; radiology; diagnostic imaging; methodology; quality control.

To cite this article:

Vasilev YuA, Vladzimirskyy AV, Omelyanskaya OV, Arzamasov KM, Chetverikov SF, Rumyantsev DA, Zelenova MA. Methodology for testing and monitoring artificial intelligence-based software for medical diagnostics. *Digital Diagnostics*. 2023;4(3):252–267. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD321971>

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD321971>

基于人工智能技术的医疗诊断软件测试和监测方法学

Yuriy A. Vasilev, Anton V. Vladzmyrskyy, Olga V. Omelyanskaya, Kirill M. Arzamasov, Sergey F. Chetverikov, Denis A. Rumyantsev, Maria A. Zelenova

Moscow Center for Diagnostics and Telemedicine, Moscow, Russian Federation

简评

论证。2016年，全球对基于人工智能技术开发医疗诊断软件的投资额为8000万美元，2017年为1.52亿美元，并预料还将继续增长。软件公司的积极活动必须符合现有的临床、生物伦理、法律和方法学原理和标准。在国家和国际范围，基于人工智能技术的软件还没有统一的测试和监测标准和协议。

该研究的目的是开发一种通用方法，用于测试和监测基于人工智能技术的医疗诊断软件，以提高其质量和在实际医疗中的应用。

材料和方法。在分析阶段，对PubMed和eLIBRARY数据库进行了文献综述。实用阶段包括在《使用创新计算机视觉技术进行医学图像分析并进一步应用于莫斯科市医疗系统的实验》框架内批准所开发的方法学，并将其进一步应用于莫斯科的医疗保健系统。

结果。我们开发了一套基于人工智能技术的医疗诊断软件测试和监测方法学，旨在提高该软件的质量，并将其应用于实际医疗保健中。该方法学包括7个阶段：自我测试、功能测试、校准测试、技术监测、临床监测、反馈和改进。

结论。该方法学的显著特点是对软件进行周期性的监测和改进，从而不断提高其质量；对软件性能结果并医生参与软件评估提出详细要求。该方法学可使软件开发人员在各个领域取得优异成绩并展示成就，也可使用户在通过独立、全面质量控制的程序中做出明智、自信的选择。

关键词：软件；人工智能；放射学；诊断成像；方法学；质量控制。

引用本文：

Vasilev YuA, Vladzmyrskyy AV, Omelyanskaya OV, Arzamasov KM, Chetverikov SF, Rumyantsev DA, Zelenova MA. 基于人工智能技术的医疗诊断软件测试和监测方法学. *Digital Diagnostics*. 2023;4(3):252–267. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD321971>

收到: 06.04.2023

接受: 15.06.2023

发布日期: 30.08.2023

ОБОСНОВАНИЕ

Мировая сумма инвестиций в компании по разработке программного обеспечения (ПО) на основе технологий искусственного интеллекта (ТИИ) для медицинской диагностики составила 80 млн долларов в 2016 году, 152 млн долларов — в 2017 и, ожидаемо, продолжает расти [1]. В России ПО на основе ТИИ в медицинской диагностике получило широкое распространение в 2019 году, когда Правительство Москвы приняло решение о проведении масштабного научного исследования, которое продолжается до сих пор (2023 год) — Эксперимента по использованию инновационных технологий в области компьютерного зрения для анализа медицинских изображений и дальнейшего применения в системе здравоохранения города Москвы (далее — Эксперимент)¹.

Активная деятельность компаний-производителей ПО должна соответствовать существующим клиническим, биоэтическим, правовым и методологическим основам и стандартам [1]. В соответствии с российским законодательством, для того чтобы ПО на основе ТИИ начало использоваться в практическом здравоохранении, а не в условиях эксперимента, оно должно пройти государственную регистрацию как медицинское изделие в установленном законом порядке, результатом чего будет получение ПО регистрационного удостоверения (РУ) Росздравнадзора².

Обязательным подготовительным этапом перед направлением ПО на регистрацию является проведение технических и клинических испытаний с целью проверки заявленного функционала ПО³. При этом как на национальном, так и на международном уровне единых стандартов и протоколов проведения испытаний не существует, что обусловлено спецификой ПО на основе ТИИ — отсутствием понятной пользователям информации о порядке работы и принципах принятия им решений [2]. Управление по контролю качества пищевых продуктов и лекарственных средств Соединённых Штатов Америки (Food and Drug Administration, FDA) также находится в процессе разработки точных рекомендаций по оценке и регулированию ПО на основе ТИИ [1]. Отсутствие возможности достоверного подтверждения выполнения ПО предъявляемых к нему требований приводит к крайне

негативным последствиям: недоверию пользователей к ПО, торможению его внедрения в практическое здравоохранение, упущенному положительному социально-экономическому эффекту от применения ПО, торможению развития здравоохранения в целом [3].

После получения ПО РУ выполняется его пострегистрационный клинический мониторинг, нацеленный на обеспечение безопасности его применения в практическом здравоохранении⁴. Однако существующие требования по проведению мониторинга являются общими для разных медицинских изделий и также не учитывают специфику ПО на основе ТИИ для медицинской диагностики [4]. Согласно решению Коллегии Евразийской экономической комиссии, мониторинг медицинских изделий третьего класса риска, к которому относится ПО на основе ТИИ, выполняется ежегодно в течение трёх лет после получения РУ⁵. Однако высокая вариабельность медицинских данных и трудность прогнозирования изменений окружающих условий, например эпидемиологической обстановки, обуславливают необходимость более частого проведения мониторинга [5]. В ходе мониторинга возможно выявление критических замечаний к результатам работы ПО, что будет требовать его доработки, а после доработки ПО будут необходимы повторное тестирование и мониторинг.

ПО на основе ТИИ для медицинской диагностики может изучаться посредством клинического исследования, наиболее подходящим видом которого является ретроспективное когортное исследование [1]. Данный метод оценки ПО также имеет множество недостатков, главным из которых является отличие полученных результатов работы ПО на практике и в исследовании [1]. Распространённым примером несовершенства методик внедрения ПО на основе ТИИ для медицинской диагностики в практическое здравоохранение является негативный опыт внедрения первой системы компьютерной диагностики (computer-aided diagnostic, CAD) для скрининговой маммографии. Результаты масштабных многоцентровых исследований показали повышение выявляемости рака молочной железы на 2–10% благодаря использованию данного ПО [6]. В 1998 году ПО было одобрено регулятором FDA для начала использования в практическом здравоохранении. Однако в условиях практического

¹ Постановление Правительства Москвы от 21.11.2019 № 1543-ПП «О проведении эксперимента по использованию инновационных технологий в области компьютерного зрения для анализа медицинских изображений и дальнейшего применения в системе здравоохранения города Москвы». Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/563879961>.

² Постановление Правительства РФ от 24.11.2020 № 1906 «О внесении изменений в Правила государственной регистрации медицинских изделий». Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202011270010>.

³ Федеральный закон от 21.11.2011 № 323-ФЗ «Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации». Ст. 38. Медицинские изделия. Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_121895/ddcfdddbbb49e64f085b65473218611b4bb6cd65/.

⁴ Приказ Минздрава России от 15.09.2020 № 980н «Об утверждении Порядка осуществления мониторинга безопасности медицинских изделий». Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/566006416>.

⁵ Решение Коллегии Евразийской экономической комиссии от 22.12.2015 № 174 «Об утверждении Правил проведения мониторинга безопасности, качества и эффективности медицинских изделий». Режим доступа: <https://www.alta.ru/tamdoc/15kr0174/>.

здравоохранения данное ПО не достигло положительных результатов и даже привело к снижению выявляемости заболевания и повышению уровня ложноположительных результатов интерпретации маммографических исследований [6]. Одно из объяснений, предлагаемых в литературе, заключается в том, что рентгенологи с разным уровнем опыта работы использовали новую технологию по-разному. Более опытные врачи не обращали на неё внимания, а менее опытные — совершали ошибки из-за возникающего за счёт неё ложного чувства безопасности. Второе объяснение заключается в том, что ПО оказалось неэффективным в выявлении определённых форм рака, что не было выявлено в ранее выполненных исследованиях [1].

Таким образом, несмотря на то, что наиболее характерными для сферы ПО на основе ТИИ являются проблемы этического и правового характера, также существует немаловажная методологическая проблема, которая может быть сформулирована как проблема отсутствия универсальной и комплексной методологии тестирования и мониторинга ПО на основе ТИИ для медицинской диагностики, направленной на повышение его качества и дальнейшее внедрение в практическое здравоохранение [7]. На основании всего вышесказанного представляется актуальным создание такой методологии. Стоит отметить, что методология не будет являться заменой существующей методики оценки безопасности и эффективности ПО, утверждённой законодательно, а будет существовать независимо и являться дополнением, позволяющим повысить шансы ПО успешно получить РУ Росздравнадзора, а после его получения — выполнять дальнейшую оценку и улучшение ПО с целью эффективного внедрения в практическое здравоохранение.

Цель исследования — разработать универсальную методологию тестирования и мониторинга ПО на основе ТИИ для медицинской диагностики, направленную на повышение его качества и внедрение в практическое здравоохранение.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Дизайн исследования

Аналитическое исследование, включающее анализ литературы и собственного опыта, на основании которого была разработана представленная методология.

Разработка методологии

Разработка методологии состояла из двух этапов — аналитического и практического.

В ходе аналитического этапа с целью изучения существующих методологий выполнен обзор литературы, опубликованной в период с 2018 по 2023 год (последние 5 лет) в научных библиотеках PubMed и eLIBRARY, по запросам «methodology for evaluation artificial intelligence in radiology» и «методология оценки искусственного интеллекта в рентгенологии». Работы включались в анализ после оценки их релевантности путём прочтения названия и абстракта. Всего было проанализировано 22 работы [1–22] и 5 нормативно-правовых актов⁶.

Далее методология была апробирована в рамках Эксперимента по использованию инновационных технологий в области компьютерного зрения для анализа медицинских изображений и дальнейшего применения в системе здравоохранения города Москвы, проводимого на базе Единой радиологической информационной сети (ЕРИС) Единой медицинской информационно-аналитической системы (ЕМИАС) города Москвы. Некоторые результаты апробации методологии приведены в данной статье в качестве иллюстрации.

Статистическое обоснование объёма выборок

Определено следующее количество исследований в выборке на разных этапах оценки.

1. На этапе самотестирования объём набора данных (НД) не регламентирован и варьирует в зависимости от клинической задачи, решаемой ПО⁷. НД, используемые на этапах самотестирования, функционального и калибровочного тестирования, подготовлены с учётом данных экспертного консенсуса, в отдельных случаях — с учётом гистологических заключений (например, для оценки злокачественных новообразований). Подробно процесс подготовки НД описан в регламенте его подготовки [19].
2. На этапе функционального тестирования — НД из 5 исследований (согласно ГОСТ Р 8.736–2011, под многократными измерениями понимают не менее четырёх измерений)⁸. Истинным значением считается заключение врача-эксперта. Врач-эксперт — врач, работающий по специальности более 5 лет и описывающий исследования по данному направлению (определённая модальность и целевая патология) на потоке, прошедший инструктаж по работе с ПО на основе

⁶ Постановление Правительства Москвы РФ от 21.11.2019 № 1543-ПП (<https://docs.cntd.ru/document/563879961>); Постановление Правительства РФ от 24.11.2020 № 1906 (<http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202011270010>); Ст. 38 ФЗ от 21.11.2011 № 323-ФЗ (https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_121895/); Приказ Минздрава России от 15.09.2020 № 980н (<https://docs.cntd.ru/document/566006416>); Приказ Департамента здравоохранения г. Москвы от 16.02.2023 № 134 (https://mosmed.ai/documents/227/приказ_ДЗМ__134_от_16.02.2023.pdf).

⁷ Центр диагностики и телемедицины. Официальный сайт. Наборы данных. Режим доступа: <https://mosmed.ai/datasets/>.

⁸ ГОСТ Р 8.736–2011. Национальный стандарт Российской Федерации. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200089016>.

- ТИИ. В данном этапе участвуют как минимум один технический специалист и один врач-эксперт.
3. На этапе калибровочного тестирования — НД из 100 исследований с балансом классов 50/50 (50% исследований с целевой патологией, 50% — без)⁹ [20, 21]. На данном этапе участвуют как минимум один технический специалист и один врач-эксперт.
 4. На этапе технологического мониторинга — все исследования, проанализированные ПО за отчётный период для дефектов «а, б» (на основании автоматизации выявления дефектов), и выборка из 80 исследований для дефектов «в-д»¹⁰ [20, 21]. В данном этапе участвует как минимум один технический специалист.
 5. На этапе клинического мониторинга — вышеуказанная выборка из 80 исследований, истинным значением считается заключение врача-эксперта¹¹ [20, 21]. На данном этапе участвует один врач-эксперт.

Этическая экспертиза

Настоящая работа проводилась в рамках ранее одобренного локальным этическим комитетом исследования (№ НСТ04489992) «Эксперимент по использованию инновационных технологий в области компьютерного зрения для анализа медицинских изображений и дальнейшего применения в системе здравоохранения города Москвы» (Московский эксперимент).

РЕЗУЛЬТАТЫ

По результатам анализа литературы были найдены работы, посвящённые отдельным этапам оценки ПО

на основе ТИИ для медицинской диагностики: валидации [1, 5, 8, 9], мониторингу [10], а также внедрению [7, 11–13] и нормативному регулированию ПО [14, 15]. При этом не обнаружено единой методологии тестирования и мониторинга ПО на основе ТИИ для медицинской диагностики. Существуют работы, посвящённые жизненному циклу ПО на основе ТИИ [16], однако они посвящены преимущественно ПО, предназначенному не для медицинских, а иных сфер деятельности, и не учитывают особенности ПО на основе ТИИ для медицинской диагностики. Кроме того, имеются руководства по выполнению исследований и написанию научных публикаций на тему ПО на основе ТИИ, однако с их помощью невозможно выполнить тестирование и мониторинг ПО [17, 18]. Отдельно стоит подчеркнуть, что также не обнаружено публикаций, посвящённых доработке ПО после его тестирования и мониторинга. При этом именно доработка ПО является необходимой для повышения его качества и успешного внедрения в практическое здравоохранение.

В связи с этим авторами была разработана методология тестирования и мониторинга ПО на основе ТИИ для медицинской диагностики, направленная на повышение его качества и внедрение в практическое здравоохранение. Методология состоит из 7 этапов, представленных на рис. 1. Далее в тексте для каждого этапа описаны его цель, суть и результаты.

Самотестирование

Этап самотестирования предназначен для оценки технической совместимости ПО с входными данными. Разработчикам (или поставщикам) ПО предоставляется



Рис. 1. Методология тестирования и мониторинга программного обеспечения на основе технологий искусственного интеллекта для медицинской диагностики.

⁹ Приказ Департамента здравоохранения города Москвы от 16.02.2023 № 134 «Об утверждении Порядка и условий проведения эксперимента по использованию инновационных технологий в области компьютерного зрения для анализа медицинских изображений и дальнейшего применения в системе здравоохранения города Москвы». Режим доступа: https://mosmed.ai/documents/227/приказ_ДЗМ__134_от_16.02.2023.pdf.

¹⁰ Там же.

¹¹ Там же.

доступ к открытому НД, содержащему файлы формата Dicom (Digital Imaging and Communications in Medicine), являющиеся обезличенными примерами диагностических исследований¹². В наборе данных предусмотрена следующая структура параметров: модальность, тип диагностической процедуры, производитель и модель диагностического устройства [19].

Совместимость ПО с данными позволяет выполнить техническую интеграцию ПО в рентгенологическую информационную сеть медицинского учреждения и приступить к дальнейшей оценке, начинающейся с этапа функционального тестирования¹³.

Функциональное тестирование

Функциональное тестирование — этап, в ходе которого осуществляется проверка наличия и работоспособности функций ПО, заявленных компанией-поставщиком. Проверка выполняется с технической и клинической точек зрения. С технической точки зрения ПО оценивается по следующим критериям: приоритизация исследований (триаж); наличие дополнительной серии изображений от ПО; наличие названия дополнительной серии; наличие графического обозначения ПО на изображениях дополнительной серии; наличие предупреждающей надписи «Только для исследовательских целей» на изображениях и в DICOM SR; возможность синхронизации серий; отображение вероятности наличия патологии; указание категории патологии; наличие полной структуры протокола DICOM SR (рис. 2, 3).

Эта часть функционального тестирования выполняется специалистами с техническим образованием в соответствии с базовыми функциональными требованиями, разработанными ГБУЗ города Москвы «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы» (НПКЦ ДиТ ДЗМ)¹⁴. Оценка функций ПО с медицинской точки зрения выполняется врачами-экспертами в соответствии с базовыми диагностическими требованиями, разработанными НПКЦ ДиТ ДЗМ¹⁵. Базовые диагностические требования включают такие критерии, как обязательное и опциональное содержание ответа ПО, формат и форму представленного ответа. В базовых функциональных и базовых диагностических есть как общие для всех ПО требования, так и специфичные, определённые клинической задачей, решаемой ПО.

При выявлении критических несоответствий тестирование ПО прекращается до момента устранения компанией-поставщиком их причин. Критическими считаются несоответствия базовым функциональным требованиям, поскольку они негативно сказываются на рабочих процессах врача и прямо или косвенно влияют на жизнь и здоровье пациента (рис. 4, 5).

После устранения компанией-поставщиком причин критических несоответствий проводится повторное функциональное тестирование. Претенденту предоставляется возможность повторного прохождения этапа не более 2 раз. Первое повторное прохождение претендент может выполнить спустя неограниченное время после получения протокола с неудовлетворительными результатами

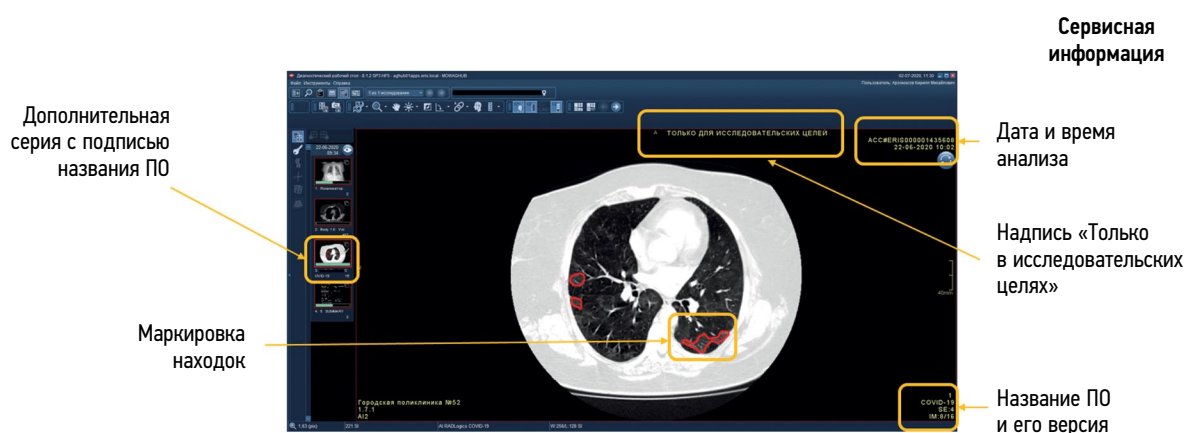


Рис. 2. Основные компоненты результата работы программного обеспечения на основе технологий искусственного интеллекта с изображением: пример эталонной работы.

¹² Центр диагностики и телемедицины. Официальный сайт. Наборы данных. Режим доступа: <https://mosmed.ai/datasets/>.

¹³ Приказ Департамента здравоохранения города Москвы от 16.02.2023 № 134 «Об утверждении Порядка и условий проведения эксперимента по использованию инновационных технологий в области компьютерного зрения для анализа медицинских изображений и дальнейшего применения в системе здравоохранения города Москвы». Режим доступа: https://mosmed.ai/documents/227/приказ_ДЗМ_134_от_16.02.2023.pdf.

¹⁴ Базовые функциональные требования к результатам работы ИИ-сервисов. Режим доступа: https://mosmed.ai/documents/218/Базовые_функциональные_требования_29.11.2022.pdf.

¹⁵ Базовые диагностические требования к результатам работы ИИ-сервисов. Режим доступа: https://mosmed.ai/documents/226/Базовые_диагностические_требования_22_02_2023.pdf.

DICOM SR 1 — сервисная информация об исследовании и сервисе

DICOM SR 2 — информация о сервисе, его назначении

DICOM SR 4 — заключение ИИ-сервиса по результатам исследования

DICOM SR 5 — детализация выявленных находок

Инвентарный №	ERIS000001990912
Дата исследования	12.08.2020 0:47
Дата заключения	12.08.2020 1:08
Статус	
Название сервиса	COVID-19
Предупреждение	ТОЛЬКО ДЛЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ЦЕЛЕЙ
Версия ПО	1.8.0
Дата и время анализа	2020-08-12 01:08

Назначение сервиса

Модальность: КТ
Анатомическая область: грудная клетка
Пациенты: взрослые население
Назначение: поиск признаков и оценка степени поражения пневмонией COVID-19 в лёгких

Краткое руководство пользователя: Очаги поражения отмечены красным контуром

Заключение

Результат обработки ИИ COVID-19:
В левой верхней доле вовлечено 1% легочной паренхимы (0 баллов).
В левой нижней доле вовлечено 16.1% легочной паренхимы (2 балла).
В правой верхней доле вовлечено 0% легочной паренхимы (0 баллов).
В правой средней доле вовлечено 0% легочной паренхимы (0 баллов).
В правой нижней доле вовлечено 0% легочной паренхимы (0 баллов).
Итого по обоим легким: 8%. Степень тяжести - КТ1

Признак COVID-19

Количество срезов, на которых обнаружены патологии: 114
Общее количество срезов лёгких: 269
Процентное соотношение положительных срезов к общему количеству срезов: 42 %

DICOM SR 3 — информация о том, как работать с сервисом (руководство пользователя)

Рис. 3. Основные компоненты результата работы программного обеспечения на основе технологий искусственного интеллекта с DICOM SR: пример эталонной работы.

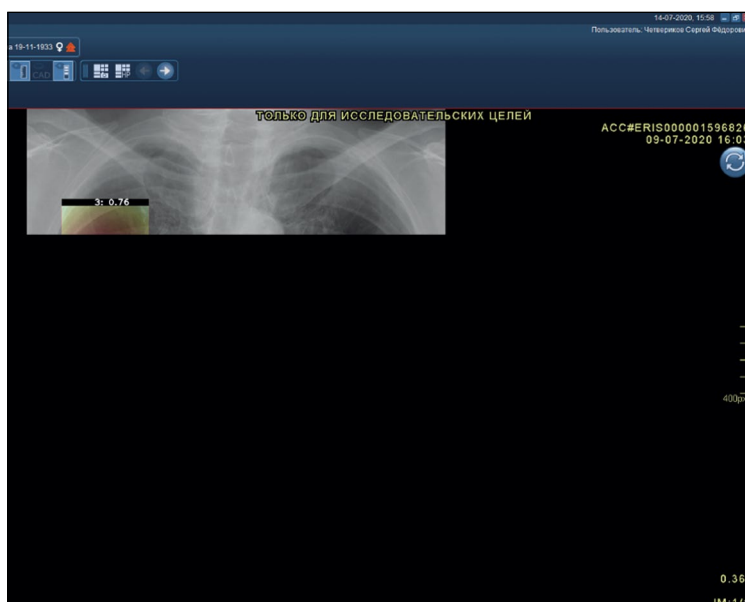


Рис. 4. Обрезка изображения дополнительной серии программного обеспечения на основе технологий искусственного интеллекта: критическое несоответствие базовым функциональным требованиям.

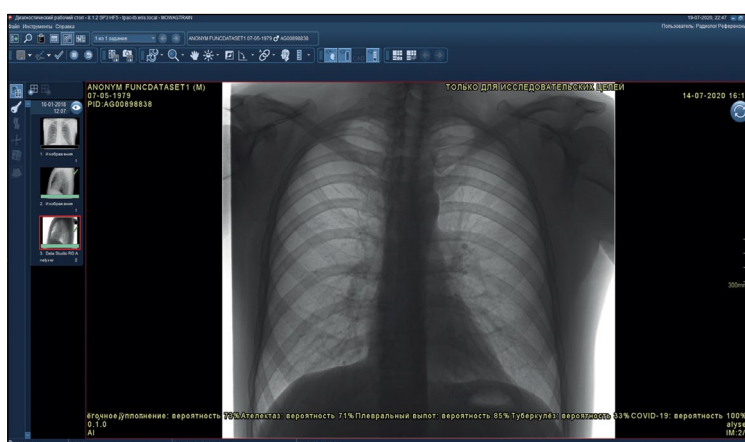


Рис. 5. Наложение подписей на изображение: критическое несоответствие базовым функциональным требованиям.

тестирования. Второе повторное прохождение осуществляется не ранее чем через 3 месяца после получения последнего протокола с неудовлетворительными результатами тестирования. При неудачном прохождении второго повторного тестирования претенденту может быть предложен альтернативный вариант научно-практического сотрудничества¹⁶. При отсутствии выявленных критических несоответствий ПО переходит на этап калибровочного тестирования¹⁷.

Калибровочное тестирование

Калибровочное тестирование — этап, в ходе которого определяются показатели диагностической точности ПО. Основным показателем является площадь под ROC-кривой (Area under the ROC Curve, AUC). При анализе ROC-кривой с помощью индекса Юдена, максимизации отрицательной и положительной прогностической ценности определяется оптимальное значение порога активации. Другие определяемые показатели включают чувствительность, специфичность, точность, прогностическую ценность положительного результата, прогностическую ценность отрицательного результата. Определяется также минимальное, среднее и максимальное время анализа одного исследования, в виде четырёхпольной таблицы представляется количество истинно положительных, ложноотрицательных, ложноположительных, истинно отрицательных результатов. Пороговые значения для некоторых показателей следующие: AUC — не менее 0,81 или 0,91 (в зависимости от клинической задачи); время, затрачиваемое на принятие, обработку исследования и передачу результатов анализа, — не более 6,5 минут; удельный вес успешно обработанных исследований — не менее 90%¹⁸ [21].

Результатом калибровочного тестирования является его протокол (рис. 6), который может содержать критические и некритические несоответствия. Критическими считаются несоответствия вышеуказанным пороговым значениям и существенные отклонения от методических рекомендаций [21]. При их выявлении тестирование ПО прекращается до момента их устранения. В случае их отсутствия ПО получает возможность начать проспективный анализ исследований в рамках этапа периодического мониторинга, включающего технологический и клинический мониторинг¹⁹.

Технологический мониторинг

Технологический мониторинг — этап, который представляет собой периодическую проверку результатов

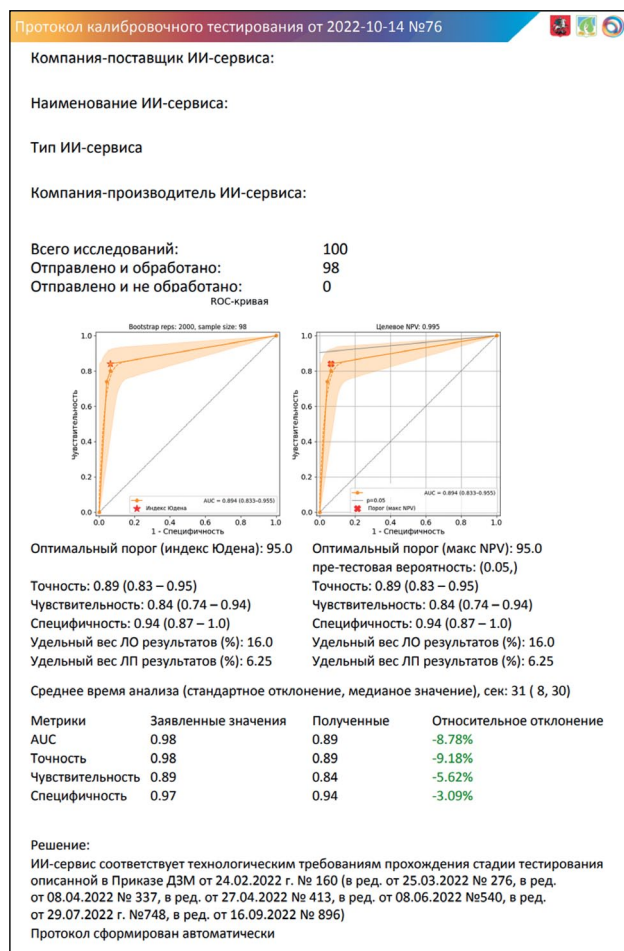


Рис. 6. Пример протокола калибровочного тестирования.

работы ПО с технической точки зрения. Данный этап необходим для оперативного выявления дефектов, оперативного контроля качества и недопущения некорректно функционирующего ПО в практику врачей-рентгенологов. Дефекты, которые могут быть выявлены на данном этапе, разделены на следующие группы:

- время, затрачиваемое на обработку одного исследования, превышает 6,5 минут;
- отсутствие результатов проанализированных исследований;
- некорректная работа заявленного функционала ПО, затрудняющая работу врача-рентгенолога или делающая её выполнение невозможным с надлежащим качеством;
- дефекты, связанные с отображением области изображений;
- иные нарушения целостности и содержимого файлов с результатами исследований, обуславливающие ограничение их диагностической интерпретации.

¹⁶ Приказ Департамента здравоохранения города Москвы от 16.02.2023 № 134 «Об утверждении Порядка и условий проведения эксперимента по использованию инновационных технологий в области компьютерного зрения для анализа медицинских изображений и дальнейшего применения в системе здравоохранения города Москвы». Режим доступа: https://mosmed.ai/documents/227/приказ_ДЗМ__134_от_16.02.2023.pdf.

¹⁷ Там же.

¹⁸ Там же.

¹⁹ Там же.

ФОРМА ВНУТРЕННЕГО ОТЧЕТА

1. Врачи-рентгенологи получают excel-файл.
2. Анализируют работу Сервиса.
3. Заполняют для каждого исследования результат параметров (1) согласно краткой инструкции (2) на вкладке «Мониторинг».
4. При наличии дефектов, заполняют вкладку «Приложения» (3).
5. При необходимости заполняют вкладку «Выводы» (4).

Краткая инструкция:

1. в колонках C, D, E, F напротив исследования ставим 1, если дефект обнаружен. Если дефекта этой группы нет, то оставляем ячейку пустой.
2. в колонках G, H напротив исследования ставим 1, если согласны, и оставляем ячейку пустой, если не согласны.
3. в колонке I ставим 1, если по мнению ИИ-сервиса в данном исследовании есть патология, иначе - пустая ячейка.
4. дефекты фиксируем скриншотами и прикладываем в следующий лист "Приложения".
5. основные замечания по мониторингу вносим в последний лист "Выводы".

В таблице могут присутствовать только единицы или пустые ячейки!

Рис. 7. Форма внутреннего отчёта проведения мониторинга работы программного обеспечения на основе технологий искусственного интеллекта.

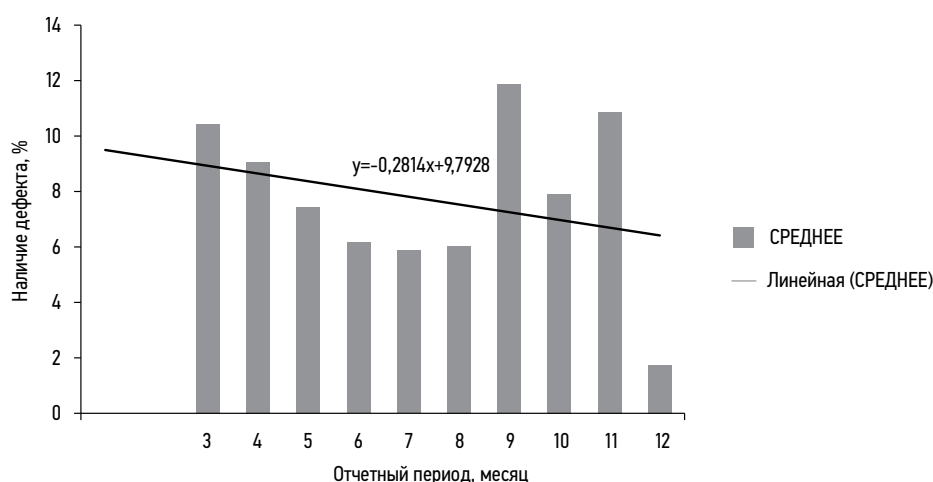


Рис. 8. Динамика технологических дефектов для программного обеспечения по модальности «рентгенография органов грудной клетки».

Мониторинг дефектов «а, б» осуществляется автоматически для всех исследований, проанализированных ПО за отчётный период, дефектов «в–д» — полуавтоматически на выборке из 80 исследований. Для корректной оценки дефектов разработана форма внутреннего отчёта проведения мониторинга работы ПО с инструкцией по мониторингу технологических дефектов (рис. 7). На рис. 8 приведена графическая информация о среднем числе технологических дефектов для направления «рентгенография органов грудной клетки», на которой наблюдается тенденция к снижению количества дефектов.

Результатом технологического мониторинга является отчёт по технологическому мониторингу (рис. 9). Если удельный вес выявленных дефектов превышает 10%, то маршрутизация исследований на данное ПО

останавливается до момента устранения причин дефектов. Если удельный вес выявленных дефектов не превышает 10%, то функционирование ПО и его периодический мониторинг продолжают²⁰.

Клинический мониторинг

В ходе периодического мониторинга выполняется также клиническая оценка результатов работы ПО врачами-рентгенологами. Двумя основными критериями оценки являются трактовка (заключение) и локализация (маркировка) патологии. Вариантами ответа, которые врачи могут выбрать в ходе оценки, являются полное соответствие, некорректная оценка, ложноположительный и ложноотрицательный результаты. Например, формулировка «Трактовка: Полное соответствие» выбирается

²⁰ Приказ Департамента здравоохранения города Москвы от 16.02.2023 № 134 «Об утверждении Порядка и условий проведения эксперимента по использованию инновационных технологий в области компьютерного зрения для анализа медицинских изображений и дальнейшего применения в системе здравоохранения города Москвы». Режим доступа: https://mosmed.ai/documents/227/приказ_ДЗМ__134_от_16.02.2023.pdf.

ОТЧЕТ ПО МОНИТОРИНГУ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ СЕРВИСА

- Компания-поставщик ИИ-сервиса:
Наименование ИИ-сервиса:
Компания-производитель ИИ-сервиса:
Идентификатор ИИ-сервиса в эксперименте:
- Отчетный период:
- Вид исследований:
- Клиническая цель:
- Общее количество исследований:
5.1. Направленных на анализ сервису за отчетный период согласно выгрузке из ЕРИС ЕМИАС, шт. 16108
5.2. Из них уникальных согласно выгрузке из ЕРИС ЕМИАС, шт. * 16108
- Количество исследований, прошедших контроль, шт. 16108
6.1. Прошедших ручной контроль, шт. 20
- Количество исследований, содержащих дефекты:
7.1. Содержащих технологический дефект «а», шт., приложение 1 32
7.2. Содержащих технологический дефект «б», шт., приложение 2 808
7.3. Содержащих технологические дефекты «в»-«е», шт., приложение 3 1
- Удельный вес исследований:
8.1. Содержащих технологический дефект «а» относительно 15300 исследований, % 0
8.2. Содержащих технологический дефект «б» относительно 16108 исследований, % 5
8.3. Содержащих технологические дефекты «в»-«е» относительно 20 исследований, % 5
- Количество исследований без дефектов, шт. 15267
- Решение:
участие ИИ-сервиса в эксперименте продолжается
- Примечания:

Дата оформления отчета:
ФИО ответственного лица: отчет сформирован автоматически

* 0 — уникальных исследований в выгрузке из ЕРИС ЕМИАС за отчетный период

Рис. 9. Пример отчёта по технологическому мониторингу.

в случае полного согласия врача с заключением от ПО, а формулировка «Трактовка: Некорректная оценка» выбирается в случае частичного согласия врача с заключением от ПО (например, согласие врача с наличием патологических находок, но несогласие с их детализацией, или, наоборот, согласие с детализацией, но несогласие с общим выводом о вероятности или степени тяжести патологических находок). Формулировки «Трактовка: Ложноположительный» и «Трактовка: Ложноотрицательный»

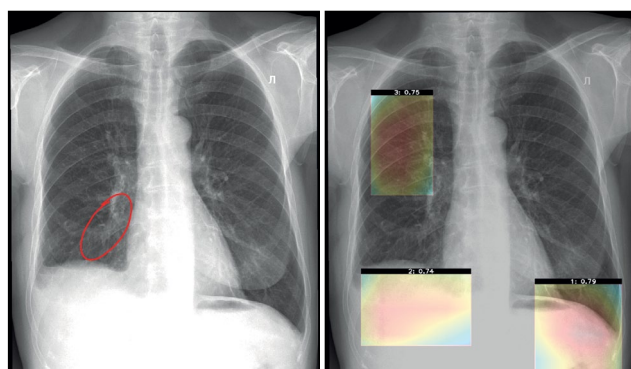


Рис. 10. Ложноотрицательное срабатывание (отсутствие локализации субсегментарного ателектаза нижней доли правого лёгкого): некритическое несоответствие базовым диагностическим требованиям.

(рис. 10) выбираются в случае полного несогласия врача с заключением от ПО.

Результаты клинической оценки заносятся в вышеуказанную форму внутреннего отчёта по мониторингу, после чего она загружается в программный модуль мониторинга, где в автоматическом режиме формируется итоговый отчёт по мониторингу.

По результатам периодического мониторинга принимается одно из заключений: «Участие ПО в Эксперименте продолжается», «Участнику Эксперимента необходимо внести изменения в работу ПО», «Участие ПО в Эксперименте приостанавливается до внесения изменений в работу ПО»²¹.

Обратная связь

Этап обратной связи от врачей-рентгенологов необходим для оценки практической значимости ПО. Форма для обратной связи находится в окне программы на автоматизированном рабочем месте врача-рентгенолога (рис. 11). Последний может согласиться или не согласиться с заключением ПО, в случае несогласия — выбрать причину. Основными причинами являются технологический дефект и диагностическая неточность. Достаточной является обратная связь от врачей по 5% всех проанализированных ПО исследований. Кроме того, обратная связь собирается с помощью анкетирования врачей, что позволяет оценить их удовлетворённость работой ПО²².

Доработка

При выявлении критического замечания к работе ПО на этапах функционального, калибровочного тестирования и периодического мониторинга тестирование ПО прекращается до момента устранения причин замечания. Доработка происходит на стороне компании-поставщика и является «чёрным ящиком» для медицинской организации. В случае необходимости доработок, не несущих в себе изменений первично заявленных функций, технической архитектуры и не затрагивающих изменений метрик диагностической точности ПО, претендент после внесения доработок может сразу перейти на следующий этап методологии.

В случае осуществления претендентом доработок, не несущих в себе изменения первично заявленных функций, технической архитектуры и затрагивающих изменения метрик диагностической точности ПО, проводится повторное функциональное, а затем калибровочное тестирование, независимо от того, на каком этапе методологии ПО находилось ранее²³.

²¹ Приказ Департамента здравоохранения города Москвы от 16.02.2023 № 134 «Об утверждении Порядка и условий проведения эксперимента по использованию инновационных технологий в области компьютерного зрения для анализа медицинских изображений и дальнейшего применения в системе здравоохранения города Москвы». Режим доступа: https://mosmed.ai/documents/227/приказ_ДЗМ__134_от_16.02.2023.pdf.

²² Там же.

²³ Там же.

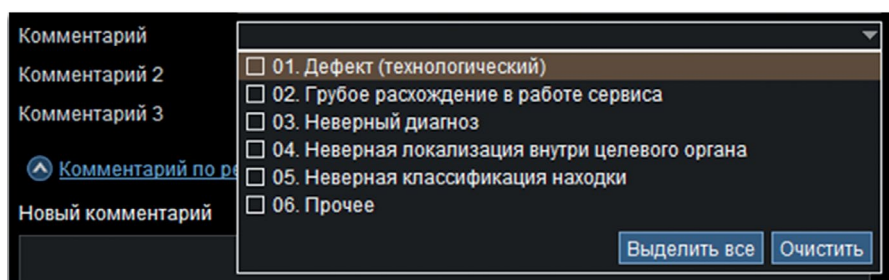


Рис. 11. Содержание окна обратной связи в пользовательском интерфейсе.

ОБСУЖДЕНИЕ

В данной работе представлена методология тестирования и мониторинга результатов работы ПО на основе ТИИ для медицинской диагностики, направленная на повышение его качества и внедрение в практическое здравоохранение. Необходимость её создания была обусловлена, во-первых, отсутствием конкретных требований к тестированию и мониторингу ПО на основе ТИИ для медицинской диагностики в существующей нормативной документации, во-вторых, отсутствием регламентированных принципов выбора медицинской организацией ПО среди многообразия существующих программ, представленных на рынке. Данная методология не нарушает установленных законодательно требований и при этом учитывает специфику ПО на основе ТИИ для медицинской диагностики. Методология включает 7 уникальных и чётко организованных этапов, обоснованных результатами научных исследований [1–4, 19–21] и подкреплённых законодательными документами²⁴.

Ценной особенностью методологии является наличие разработанных базовых функциональных и базовых диагностических требований, используемых на этапе функционального тестирования²⁵. Систематизация дефектов и требований является уникальной (в рассмотренных источниках не приведены их детальные описания). Особенно важным представляется существующее разделение несоответствий на критические и не критические, что удобно как разработчикам ПО, так и пользователям. На мировом уровне известными являются документы Института наук о данных Американской коллегии радиологов, в которых описаны клинические задачи, решаемые с помощью ПО, ожидаемые входные и выходные данные²⁶.

Другой важной особенностью методологии являются обязательное проведение калибровки ПО на локальных

данных (этап калибровочного тестирования) и последующая валидация на потоке реальных данных (этап периодического мониторинга). По данным зарубежного систематического обзора [22], только 6% ПО на основе ТИИ проходили этапы внешней валидации. Валидация может быть разделена на «широкую» и «узкую» [8]. Целью «узкой» валидации является оценка «правильности» продукта, т.е. насколько результаты его использования соответствуют целям его использования. К ней можно отнести клиническую валидацию и оценку удобства использования. «Широкая» валидация включает «узкую» валидацию, а также является синонимом контроля качества, т.е. гарантией того, что ПО было разработано с помощью лучших практик и методов. К ней можно отнести анализ алгоритма, тестирование ПО, исследование документации. В таком случае оценивается внутренняя структура ПО, и оно становится «белым ящиком» [8].

Отдельно стоит отметить наличие в методологии этапа доработки ПО после выявления критических несоответствий. Именно доработка ПО приводит к постепенному снижению количества технологических дефектов и повышению показателей диагностической точности ПО. Таким образом, методология позволит разработчикам ПО на основе ТИИ для медицинской диагностики достичь высоких результатов в различных направлениях, а пользователям — сделать осознанный и уверенный выбор среди ПО, прошедших независимую проверку качества, что в конечном счёте приведёт к внедрению ПО в практическое здравоохранение, снижению трудозатрат рентгенолога и повышению эффективности интерпретации диагностических исследований, т.е. достижению первоначальной цели автоматизации процессов с помощью ТИИ.

Данная методология не является заменой процесса регистрации медицинских изделий в рамках установленных процедур. При этом вся методология или отдельные

²⁴ Постановление Правительства Москвы от 21.11.2019 № 1543-ПП (<https://docs.cntd.ru/document/563879961>); Приказ Департамента здравоохранения г. Москвы от 16.02.2023 № 134 (https://mosmed.ai/documents/227/приказ_ДЗМ__134_от_16.02.2023.pdf).

²⁵ Базовые функциональные требования к результатам работы ИИ-сервисов (https://mosmed.ai/documents/218/Базовые_функциональные_требования_29.11.2022.pdf); Базовые диагностические требования к результатам работы ИИ-сервисов (https://mosmed.ai/documents/226/Базовые_диагностические_требования_22_02_2023.pdf).

²⁶ ACR Data Science Institute Releases Landmark Artificial Intelligence Use Cases. 2018. Режим доступа: <https://www.acr.org/Media-Center/ACR-News-Releases/2018/ACR-Data-Science-Institute-Releases-Landmark-Artificial-Intelligence-Use-Cases>.

её этапы и подходы могут быть реализованы для оценки безопасности и эффективности ПО на основе ТИИ со стороны регулирующих органов, а также быть частью системы менеджмента качества производителей. Методология может использоваться как разработчиками ПО, например, в процессе составления плана пострегистрационного клинического мониторинга, который должен быть представлен в комплекте документов при регистрации медицинских изделий, так и медицинскими организациями с целью выбора наиболее подходящего для конкретных условий и целей ПО [4]. Методология может применяться неопределённо долго, удовлетворяя требованиям как Евразийской экономической комиссии по проведению мониторинга в течение 3 лет, так и рекомендациям FDA по проведению мониторинга на протяжении всего периода эксплуатации продукта.

Наличие у ПО на основе ТИИ регистрационного удостоверения не является обоснованием того, что проходить все или отдельные этапы представленной методологии не надо, как минимум по двум причинам. Во-первых, регистрационное удостоверение могло быть получено при испытании на определённом диагностическом оборудовании, и при работе ПО на другом оборудовании результаты работы ПО могут измениться. Во-вторых, регистрационное удостоверение могло быть получено для решения ПО определённой клинической задачи, а в дальнейшем разработчики могут дополнить функции ПО.

Приведённые в данной работе примеры относятся к области рентгенологии, однако методология может быть применима для ПО на основе ТИИ, используемого в других областях клинической медицины. В таком случае потребуется корректировка отдельных форм: списка технологических дефектов, клинической оценки и др.

Ограничения исследования

Ограничением методологии является разобщённость компании-производителя и организации, выполняющей оценку. Во многих методологиях разработка ПО и его оценка выполняются одной компанией (методология «от концепции до внедрения») [16]. В случае представленной методологии оценка выполняется сторонней организацией ближе к этапу внедрения. Ошибки, совершённые разработчиком на ранних этапах разработки, тем не менее могут быть выявлены, но исправить их разработчику может быть сложнее.

На этапе периодического мониторинга ПО анализирует большое количество исследований (более 1000). Возможность контроля качества всех исследований отсутствует по причине ограниченности ресурсов, количества врачей-экспертов и их рабочего времени. Несмотря на автоматизированное формирование репрезентативной псевдослучайной выборки исследований, на этапе периодического мониторинга возможен пропуск ошибок, обусловленный систематической ошибкой выборки.

Перспективы исследования

1. Публикация результатов оценки ПО с помощью представленной методологии (гипотеза — оценка ПО в соответствии с представленной методологией приводит к повышению показателей диагностической точности и практической значимости ПО на основе ТИИ в медицинской диагностике).
2. Сравнение ПО, получивших и не получивших РУ Росздравнадзора, с помощью представленной методологии.
3. Создание в методологии этапа тестирования, целью которого будет оценка результатов обработки ПО «неудовлетворительных» исследований (исследования с неподходящей для данного ПО анатомической областью, модальностью, артефактами, неправильной укладкой пациента, наличием имплантатов и другого медицинского оборудования).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методология тестирования и мониторинга ПО на основе ТИИ для медицинской диагностики, направленная на повышение его качества и внедрение в практическое здравоохранение. Методология состоит из 7 этапов: самотестирование, функциональное тестирование, калибровочное тестирование, технологический мониторинг, клинический мониторинг, обратная связь и доработка. Отличительными особенностями методологии являются цикличность этапов тестирования, мониторинга и доработки ПО, приводящая к постоянному повышению качества ПО; наличие подробных требований к результатам работы ПО; участие врачей в оценке ПО. Методология позволит разработчикам ПО достичь высоких результатов и продемонстрировать достижения в различных направлениях, пользователям — сделать осознанный и уверенный выбор среди ПО, прошедших независимую и всестороннюю проверку качества.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Источник финансирования. Данная статья подготовлена авторским коллективом в рамках работы № ЕГИСУ: «Разработка платформы повышения качества ИИ-Сервисов для медицинской диагностики», № 123031400006-0, в соответствии с Приказом Департамента здравоохранения города Москвы от 21.12.2022 № 1196 «Об утверждении государственных заданий, финансовое обеспечение которых осуществляется за счёт средств бюджета города Москвы государственным бюджетным (автономным) учреждениям, подведомственным Департаменту здравоохранения города Москвы, на 2023 год и плановый период 2024 и 2025 годов».

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства 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 распределён следующим образом: Ю.А. Васильев — разработка концепции, утверждение итогового варианта рукописи; А.В. Владимирский — разработка концепции, утверждение итогового варианта рукописи; О.В. Омелянская — разработка методологии, утверждение итогового варианта рукописи; К.М. Арзамасов — разработка концепции, проведение исследования, редактирование и утверждение итогового варианта текста рукописи; С.Ф. Четвериков — разработка методологии, проведение исследования; Д.А. Румянцев — анализ литературных данных, написание и редактирование текста статьи; М.А. Зеленова — редактирование текста статьи.

ADDITIONAL INFORMATION

Funding source. This article was prepared by a group of authors as a part of the research and development effort titled "Development of a platform for improving the quality of AI services for clinical diagnostics", No. 123031400006-0 in accordance with the Order No.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Oakden-Rayner L., Palme L.J. Artificial intelligence in medicine: Validation and study design. In: Ranschart E., Morozov S., Algra P., eds. Artificial intelligence in medical imaging. Cham: Springer, 2019. P. 83–104.
2. Морозов С.П., Зинченко В.В., Хоружая А.Н., и др. Стандартизация искусственного интеллекта в здравоохранении: Россия выходит в лидеры // Врач и информационные технологии. 2021. № 2. С. 12–19. doi: 10.25881/18110193_2021_2_12
3. Мелдо А.А., Уткин Л.В., Трофимова Т.Н. Искусственный интеллект в медицине: современное состояние и основные направления развития интеллектуальной диагностики // Лучевая диагностика и терапия. 2020. № 1. С. 9–17. doi: 10.22328/2079-5343-2020-11-1-9-17
4. Зинченко В.В., Арзамасов К.М., Четвериков С.Ф., и др. Методология проведения пострегистрационного клинического мониторинга для программного обеспечения с применением технологий искусственного интеллекта // Современные технологии в медицине. 2022. Т. 14, № 5. С. 15–25. doi: 10.17691/stm2022.14.5.02
5. Tanguay W., Acar P., Fine B., et al. Assessment of radiology artificial intelligence software: A validation and evaluation framework // Can Assoc Radiol J. 2023. Vol. 74, N 2. P. 326–333. doi: 10.1177/08465371221135760
6. Kohli A., Jha S. Why CAD failed in mammography // J Am Coll Radiol. 2018. Vol. 15, N 3, Pt. B. P. 535–537. doi: 10.1016/j.jacr.2017.12.029
7. Recht M.P., Dewey M., Dreyer K., et al. Integrating artificial intelligence into the clinical practice of radiology: Challenges and recommendations // Eur Radiol. 2020. Vol. 30, N 6. P. 3576–3584. doi: 10.1007/s00330-020-06672-5
8. Higgins D.C., Johnner C. Validation of artificial intelligence containing products across the regulated healthcare industries // Ther Innov Regul Sci. 2023. Vol. 57, N 4. P. 797–809. doi: 10.1007/s43441-023-00530-4
9. Rudolph J., Schachtner B., Fink N., et al. Clinically focused multi-cohort benchmarking as a tool for external validation of artificial intelligence algorithm performance in basic chest radiography analysis // Sci Rep. 2022. Vol. 12, N 1. P. 12764. doi: 10.1038/s41598-022-16514-7
10. Allen B., Dreyer K., Stibolt R., et al. Evaluation and real-world performance monitoring of artificial intelligence models in clinical practice: Try it, buy it, check it // J Am Coll Radiol. 2021. Vol. 18, N 11. P. 1489–1496. doi: 10.1016/j.jacr.2021.08.022
11. Strohm L., Hehakaya C., Ranschaert E.R., et al. Implementation of artificial intelligence (AI) applications in radiology: Hindering and facilitating factors // Eur Radiol. 2020. Vol. 30, N 10. P. 5525–5532. doi: 10.1007/s00330-020-06946-y
12. Sohn J.H., Chillakuru Y.R., Lee S., et al. An open-source, vendor agnostic hardware and software pipeline for integration of artificial intelligence in radiology workflow // J Digit Imaging. 2020. Vol. 33, N 4. P. 1041–1046. doi: 10.1007/s10278-020-00348-8
13. Wichmann J.L., Willeminck M.J., De Cecco C.N. Artificial intelligence and machine learning in radiology: Current state and considerations for routine clinical implementation // Invest Radiol. 2020. Vol. 55, N 9. P. 619–627. doi: 10.1097/RLI.0000000000000673
14. Larson D.B., Harvey H., Rubin D.L., et al. Regulatory frameworks for development and evaluation of artificial intelligence-based diagnostic imaging algorithms: Summary and recommendations // J Am Coll Radiol. 2021. Vol. 18, N 3, Pt. A. P. 413–424. doi: 10.1016/j.jacr.2020.09.060
15. Milam M.E., Koo C.W. The current status and future of FDA-approved artificial intelligence tools in chest radiology in the United States // Clin Radiol. 2023. Vol. 78, N 2. P. 115–122. doi: 10.1016/j.crad.2022.08.135
16. De Silva D., Alahakoon D. An artificial intelligence life cycle: From conception to production // Patterns (NY). 2022. Vol. 3, N 6. P. 100489. doi: 10.1016/j.patter.2022.100489

17. Cerdá-Alberich L., Solana J., Mallol P., et al. MAIC-10 brief quality checklist for publications using artificial intelligence and medical images // *Insights Imaging*. 2023. Vol. 14, N 1. P. 11. doi: 10.1186/s13244-022-01355-9
18. Vasey B., Novak A., Ather S., et al. DECIDE-AI: A new reporting guideline and its relevance to artificial intelligence studies in radiology // *Clin Radiol*. 2023. Vol. 78, N 2. P. 130–136. doi: 10.1016/j.crad.2022.09.131
19. Регламент подготовки наборов данных с описанием подходов к формированию репрезентативной выборки данных. Москва: Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы, 2022. 40 с. (Лучшие практики лучевой и инструментальной диагностики; Часть 1).
20. Четвериков С.Ф., Арзамасов К.М., Андрейченко А.Е., и др. Подходы к формированию выборки для контро-

- ля качества работы систем искусственного интеллекта в медико-биологических исследованиях // *Современные технологии в медицине*. 2023. Т. 15, № 2. С. 19–27. doi: 10.17691/stm2023.15.2.02
21. Морозов С.П., Владзимирский А.В., Кляшторный В.Г., и др. Клинические испытания программного обеспечения на основе интеллектуальных технологий (лучевая диагностика). Москва: Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы, 2019. 33 с.
22. Kim D.W., Jang H.Y., Kim K.W., et al. Design characteristics of studies reporting the performance of artificial intelligence algorithms for diagnostic analysis of medical images: Results from recently published papers // *Korean J Radiol*. 2019. Vol. 20, N 3. P. 405–410. doi: 10.3348/kjr.2019.0025

REFERENCES

1. Oakden-Rayner L, Palme LJ. Artificial intelligence in medicine: Validation and study design. In: Ranschart E, Morozov S, Algra P, eds. *Artificial intelligence in medical imaging*. Cham: Springer; 2019. P. 83–104.
2. Morozov SP, Zinchenko VV, Khoruzhaya AN, et al. Standardization of artificial intelligence in healthcare: Russia is becoming a leader. *Doctor Inform Technol*. 2021;(2):12–19. (In Russ). doi: 10.25881/18110193_2021_2_12
3. Mello AA, Utkin LV, Trofimova TN. Artificial intelligence in medicine: The current state and main directions of development of intellectual diagnostics. *Radiation Diagnost Therapy*. 2020;(1):9–17. (In Russ). doi: 10.22328/2079-5343-2020-11-1-9-17
4. Zinchenko VV, Arzamasov KM, Chetverikov SF, et al. Methodology of post-registration clinical monitoring for software using artificial intelligence technologies. *Modern Technol Med*. 2022;14(5):15–25. (In Russ). doi: 10.17691/stm2022.14.5.02
5. Tanguay W, Acar P, Fine B, et al. Assessment of radiology artificial intelligence software: A validation and evaluation framework. *Can Assoc Radiol J*. 2023;74(2):326–333. doi: 10.1177/08465371221135760
6. Kohli A, Jha S. Why CAD failed in mammography. *J Am Coll Radiol*. 2018;15(3 Pt B):535–537. doi: 10.1016/j.jacr.2017.12.029
7. Recht MP, Dewey M, Dreyer K, et al. Integrating artificial intelligence into the clinical practice of radiology: Challenges and recommendations. *Eur Radiol*. 2020;30(6):3576–3584. doi: 10.1007/s00330-020-06672-5
8. Higgins DC, Johnner C. Validation of artificial intelligence containing products across the regulated healthcare industries. *Ther Innov Regul Sci*. 2023;57(4):797–809. doi: 10.1007/s43441-023-00530-4
9. Rudolph J, Schachtner B, Fink N, et al. Clinically focused multi-cohort benchmarking as a tool for external validation of artificial intelligence algorithm performance in basic chest radiography analysis. *Sci Rep*. 2022;12(1):12764. doi: 10.1038/s41598-022-16514-7
10. Allen B, Dreyer K, Stibolt R, et al. Evaluation and real-world performance monitoring of artificial intelligence models in clinical practice: Try it, buy it, check it. *J Am Coll Radiol*. 2021;18(11):1489–1496. doi: 10.1016/j.jacr.2021.08.022
11. Strohm L, Hehakaya C, Ranschaert ER, et al. Implementation of artificial intelligence (AI) applications in radiology: Hindering and facilitating factors. *Eur Radiol*. 2020;30(10):5525–5532. doi: 10.1007/s00330-020-06946-y
12. Sohn JH, Chillakuru YR, Lee S, et al. An open-source, vendor agnostic hardware and software pipeline for integration of artificial intelligence in radiology workflow. *J Digit Imaging*. 2020;33(4):1041–1046. doi: 10.1007/s10278-020-00348-8
13. Wichmann JL, Willeminck MJ, De Cecco CN. Artificial intelligence and machine learning in radiology: Current state and considerations for routine clinical implementation. *Invest Radiol*. 2020;55(9):619–627. doi: 10.1097/RLI.0000000000000673
14. Larson DB, Harvey H, Rubin DL, et al. Regulatory frameworks for development and evaluation of artificial intelligence-based diagnostic imaging algorithms: Summary and recommendations. *J Am Coll Radiol*. 2021;18(3 Pt A):413–424. doi: 10.1016/j.jacr.2020.09.060
15. Milam ME, Koo CW. The current status and future of FDA-approved artificial intelligence tools in chest radiology in the United States. *Clin Radiol*. 2023;78(2):115–122. doi: 10.1016/j.crad.2022.08.135
16. De Silva D, Alahakoon D. An artificial intelligence life cycle: From conception to production. *Patterns (NY)*. 2022;3(6):100489. doi: 10.1016/j.patter.2022.100489
17. Cerdá-Alberich L, Solana J, Mallol P, et al. MAIC-10 brief quality checklist for publications using artificial intelligence and medical images. *Insights Imaging*. 2023;14(1):11. doi: 10.1186/s13244-022-01355-9
18. Vasey B, Novak A, Ather S, et al. DECIDE-AI: A new reporting guideline and its relevance to artificial intelligence studies in radiology. *Clin Radiol*. 2023;78(2):130–136. doi: 10.1016/j.crad.2022.09.131
19. Regulations for the preparation of data sets with a description of approaches to the formation of a representative sample of data. Moscow: Scientific and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Department of Health of the City of Moscow; 2022. 40 p. (Best practices in radiological and instrumental diagnostics; Part 1). (In Russ).

20. Chetverikov S, Arzamasov KM, Andreichenko AE, et al. Approaches to sampling for quality control of artificial intelligence systems in biomedical research. *Modern Technol Med.* 2023;15(2):19–27. (In Russ). doi: 10.17691/stm2023.15.2.02
21. Morozov SP, Vladzimirsky AV, Klyashtorny VG, et al. Clinical trials of software based on intelligent technologies (radiation diagnostics). Moscow: Scientific and Practical Clinical Center for Diagnostics and

- Telemedicine Technologies of the Department of Health of the City of Moscow; 2019. 33 p. (In Russ).
22. Kim DW, Jang HY, Kim KW, et al. Design characteristics of studies reporting the performance of artificial intelligence algorithms for diagnostic analysis of medical images: Results from recently published papers. *Korean J Radiol.* 2019;20(3):405–410. doi: 10.3348/kjr.2019.0025

ОБ АВТОРАХ

* Румянцев Денис Андреевич;

адрес: Россия, 127051, Москва, ул. Петровка, д. 24, стр. 1;
ORCID: 0000-0001-7670-7385;
eLibrary SPIN: 8734-2085;
e-mail: RumyantsevDA3@zdrav.mos.ru

Васильев Юрий Александрович, канд. мед. наук;

ORCID: 0000-0002-0208-5218;
eLibrary SPIN: 4458-5608;
e-mail: npcmmr@zdrav.mos.ru

Владзими́рский Анто́н Вячесла́вович, д-р мед. наук;

ORCID: 0000-0002-2990-7736;
eLibrary SPIN: 3602-7120;
e-mail: npcmmr@zdrav.mos.ru

Омелянская Ольга Васильевна;

ORCID: 0000-0002-0245-4431;
eLibrary SPIN: 8948-6152;
e-mail: npcmmr@zdrav.mos.ru

Арзамасов Кирилл Михайлович, канд. мед. наук;

ORCID: 0000-0001-7786-0349;
eLibrary SPIN: 3160-8062;
e-mail: ArzamasovKM@zdrav.mos.ru

Четвериков Сергей Федорович, канд. тех. наук;

ORCID: 0000-0002-3097-8881;
eLibrary SPIN: 3815-8870;
e-mail: ChetverikovSF@zdrav.mos.ru

Зеленова Мария Александровна;

ORCID: 0000-0001-7458-5396;
eLibrary SPIN: 3823-6872;
e-mail: ZelenovaMA@zdrav.mos.ru

AUTHORS' INFO

* Denis A. Rumyantsev;

address: 24/1 Petrovka street, 127051 Moscow, Russia;
ORCID: 0000-0001-7670-7385;
eLibrary SPIN: 8734-2085;
e-mail: RumyantsevDA3@zdrav.mos.ru

Yuriy A. Vasilev, MD, Cand. Sci. (Med.);

ORCID: 0000-0002-0208-5218;
eLibrary SPIN: 4458-5608;
e-mail: npcmmr@zdrav.mos.ru

Anton V. Vladzimirsky, MD, Dr. Sci. (Med.);

ORCID: 0000-0002-2990-7736;
eLibrary SPIN: 3602-7120;
e-mail: npcmmr@zdrav.mos.ru

Olga V. Omelyanskaya;

ORCID: 0000-0002-0245-4431;
eLibrary SPIN: 8948-6152;
e-mail: npcmmr@zdrav.mos.ru

Kirill M. Arzamasov, MD, Cand. Sci. (Med.);

ORCID: 0000-0001-7786-0349;
eLibrary SPIN: 3160-8062;
e-mail: ArzamasovKM@zdrav.mos.ru

Sergei F. Chetverikov, Cand. Sci. (Engin.);

ORCID: 0000-0002-3097-8881;
eLibrary SPIN: 3815-8870;
e-mail: ChetverikovSF@zdrav.mos.ru

Maria A. Zelenova;

ORCID: 0000-0001-7458-5396;
eLibrary SPIN: 3823-6872;
e-mail: ZelenovaMA@zdrav.mos.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD375285>

Частота сердечных осложнений у детей, выявленных после радикальной коррекции тетрады Фалло с помощью компьютерной томографии

А.М. Кабдуллина¹, В.Е. Сеницын², Р.И. Рахимжанова¹, Т.Б. Даутов³, А.Б. Садуакасова⁴,
Б.Б. Калиев¹, Л.А. Бастарбекова¹, З.А. Молдаханова¹

¹ Медицинский университет Астана, Астана, Казахстан;

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация;

³ Национальный научный кардиохирургический центр Республики Казахстан, Астана, Казахстан;

⁴ Больница Медицинского центра Управления делами Президента Республики Казахстан, Астана, Казахстан

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Частота возникновения тетрады Фалло составляет примерно 0,5/1000 живорождённых, что соответствует 7–10% всех случаев врождённых пороков сердца и является второй по частоте формой сложных врождённых пороков сердца. Достижения в области диагностики, хирургического и послеоперационного лечения тетрады Фалло привели к тому, что всё большее число пациентов этой категории достигает зрелого возраста, при этом наблюдается резкое увеличение выживаемости (почти до 90%) к 30 годам, что требует длительного мониторинга определённых анатомических параметров для своевременного выявления осложнений. Данное исследование направлено на изучение частоты осложнений, выявленных с помощью компьютерной томографии, после радикальной коррекции тетрады Фалло у пациентов детского возраста.

Цель — выявить с помощью компьютерной томографии маркеры наиболее часто встречающихся осложнений после коррекции тетрады Фалло у пациентов детского возраста.

Материалы и методы. Проведён ретроспективный анализ данных 613 пациентов с тетрадой Фалло за период с октября 2011 по июнь 2020 года. В исследование были включены 116 пациентов, из них 69 мужского и 47 женского пола, у которых после коррекции тетрады Фалло возникли осложнения, выявленные с помощью компьютерной томографии. На момент операции средний возраст пациентов составлял от 10 до 36 (в среднем 12) месяцев, средняя масса тела 21 кг, средний рост 105,4 см, средняя площадь поверхности тела 0,74 м². Средний возраст пациентов на момент проведения компьютерной томографии составил 17,5 (возрастной диапазон 7–36) лет.

Результаты. Среди 116 пациентов с осложнениями после коррекции тетрады Фалло у 49 был стеноз лёгочной артерии, у 92 — стеноз ветвей лёгочной артерии (из них у 56 — основной ветви левой лёгочной артерии, у 36 — основной ветви правой лёгочной артерии), у 8 — стеноз выходного тракта правого желудочка, у 32 — дефект межжелудочковой перегородки, у 1 — тромбоз шунта, у 12 — послеоперационная деформация лёгочной артерии, у 10 — выраженная дилатация правого желудочка, у 2 — аневризма выходного тракта правого желудочка, в 6 случаях — кальцификация и стеноз кондуита. У пациентов со стенозом ветви левой лёгочной артерии вероятность развития стеноза ветви правой лёгочной артерии была в 6,5 раз выше ($p < 0,001$).

Заключение. Наиболее частыми осложнениями, выявляемыми с помощью компьютерной томографии после коррекции тетрады Фалло, были стеноз лёгочной артерии и её ветвей. Пациенты со стенозом лёгочной артерии и её ветвей не имели существенных различий по возрасту, антропометрическим параметрам (рост, вес, площадь поверхности тела) и гендерному распределению при наличии или отсутствии различных типов стеноза (лёгочной артерии, правой или левой лёгочной артерии), однако стеноз правой лёгочной артерии повышает вероятность развития стеноза левой ветви.

Ключевые слова: мультиспиральная компьютерная томография; тетрада Фалло; осложнения; врождённые пороки сердца; радикальная коррекция.

Как цитировать:

Кабдуллина А.М., Сеницын В.Е., Рахимжанова Р.И., Даутов Т.Б., Садуакасова А.Б., Калиев Б.Б., Бастарбекова Л.А., Молдаханова З.А. Частота сердечных осложнений у детей, выявленных после радикальной коррекции тетрады Фалло с помощью компьютерной томографии // *Digital Diagnostics*. 2023. Т. 4, № 3. С. 268–279. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD375285>

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD375285>

Frequency of various cardiac complications in children with repaired tetralogy of Fallot identified by computer tomography

Azhar M. Kabdullina¹, Valentin E. Sinitsyn², Raushan I. Rakhimzhanova¹,
Tairkhan B. Dautov³, Aigul B. Saduakassova⁴, Bauyrzhan B. Kaliyev¹,
Lyazzat A. Bastarbekova¹, Zhanar A. Moldakhanova¹

¹ Astana Medical University, Astana, Kazakhstan;

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation;

³ Department of the Radiology of National Research Cardiac Surgery Center, Astana, Kazakhstan;

⁴ Medical Centre Hospital of President's Affairs Administration of the Republic of Kazakhstan, Astana, Kazakhstan

ABSTRACT

BACKGROUND: Tetralogy of Fallot represents 7–10% of all cases of congenital heart disease, as it occurs in approximately 0.5 per 1,000 live births and is the second most common form of complex congenital heart disease. Advances in diagnosis, surgical techniques, and postoperative treatment have led to an increasing number of patients reaching adulthood, with a dramatic increase in the survival rate to almost 90% at 30 years, thereby creating a need for long-term monitoring of certain anatomic parameters to identify complications in a timely manner. This study aimed to investigate the frequency of computed tomography detected complications after radical correction of Tetralogy of Fallot in pediatric patients.

AIM: to identify markers between the most frequency computed tomography detected complications after repair of Tetralogy of Fallot in pediatric patients.

MATERIALS AND METHODS: A retrospective analysis was conducted on 613 patients with Tetralogy of Fallot from October 2011 to June 2020. The study included a total of 116 patients (69 men and 47 women) who experienced complications after a repair of Tetralogy of Fallot, as identified by computed tomography. At the time of repair of Tetralogy of Fallot, the patient's average age ranged from 10 to 36 months (mean: 12 months), average body weight was 21 kg, average height was 105.4 cm, and average body surface area was 0.74 m². The patients' median age at the time of the computed tomography examination was 17.5 years (age range: 7–36 years).

RESULTS: Among the 116 patients who exhibited complications after an repair of Tetralogy of Fallot, 49 had a pulmonary artery stenosis, 92 had a pulmonary artery branch stenosis (56 of them of the left main pulmonary artery branch, and 36 of them of the right main pulmonary artery branch), 8 had a right ventricular outflow tract stenosis, 32 had a ventricular septal defect, 1 had a shunt thrombosis, 12 had a postoperative deformation of the pulmonary artery, 10 exhibited a marked right ventricular dilatation, 2 had an right ventricular outflow tract aneurysm, and 6 suffered from conduit calcification and stenosis. Moreover, patients with left main pulmonary artery branch stenosis had a 6.5 times greater chance of developing an right main pulmonary artery branch stenosis in ($p < 0.001$).

CONCLUSION: The most frequently computed tomography detected complications after a repair of Tetralogy of Fallot were pulmonary artery stenosis and pulmonary artery branch stenosis. Patients with pulmonary artery stenosis and pulmonary artery branch stenosis exhibit no significant differences in terms of age, anthropometric parameters (height, weight, and body surface area), and gender distribution in the presence or absence of different stenosis types (pulmonary artery, right main pulmonary artery branch, or left main pulmonary artery branch). However, an right main pulmonary artery branch stenosis increases the chances of developing an left main pulmonary artery branch stenosis.

Keywords: multidetector computed tomography; tetralogy of Fallot; complications; congenital heart disease; total repair.

To cite this article:

Kabdullina AM, Sinitsyn VE, Rakhimzhanova RI, Dautov TB, Saduakassova AB, Kaliyev BB, Bastarbekova LA, Moldakhanova ZA. Frequency of various cardiac complications in children with repaired Tetralogy of Fallot identified by computer tomography. *Digital Diagnostics*. 2023;4(3):268–279. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD375285>

Received: 02.05.2023

Accepted: 09.06.2023

Published: 04.09.2023

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD375285>

电子计算机断层扫描确定的法洛四联症修复患儿各种心脏并发症的发生率

Azhar M. Kabdullina¹, Valentin E. Sinitsyn², Raushan I. Rakhimzhanova¹,
Tairkhan B. Dautov³, Aigul B. Saduakassova⁴, Bauyrzhan B. Kaliyev¹,
Lyazzat A. Bastarbekova¹, Zhanar A. Moldakhanova¹

¹ Astana Medical University, Astana, Kazakhstan;

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation;

³ Department of the Radiology of National Research Cardiac Surgery Center, Astana, Kazakhstan;

⁴ Medical Centre Hospital of President's Affairs Administration of the Republic of Kazakhstan, Astana, Kazakhstan

简评

论证。法洛四联症 (Tetralogy of Fallot, ToF) 占有先天性心脏病 (congenital heart disease, CHD) 病例的7-10%，每1000例活产中约有0.5例发生，是第二种最常见的复杂先天性心脏病。随着诊断、手术技术和术后治疗的进步，越来越多的患者长大成人，30岁时的存活率急剧上升到近 90%，因此需要对某些解剖参数进行长期监测，以便及时发现并发症。本研究旨在调查儿童患者患儿根治性矫正ToF后计算机断层扫描 (computed tomography, CT) 发现并发症的发生率。

该研究的目的是确定小儿ToF修复术 (repair of ToF, rToF) 后CT检测到的最常见并发症之间的标记。

材料和方法。我们对2011年10月至2020年6月期间的613例ToF患者进行了回顾性分析。116名患者 (69名男性和47名女性) 被纳入该研究，这些患者在接受rToF后出现了通过CT发现的并发症。患者接受rToF时的平均年龄为10至36个月 (平均值为12个月)，平均体重为21kg，平均身高为105.4cm，平均体表面积 (body surface area, BSA) 为0.74m²。患者接受CT检查时的中位年龄为17.5岁 (年龄范围：7至36岁)。

结果。在116例rToF后出现并发症的患者中，49例有肺动脉 (pulmonary artery, PA) 狭窄，92例有PA分支狭窄 (其中56例有PA左主分支 (left main PA branch, LPA)，36例有PA右主分支 (right main PA branch, RPA))，8例有右室流出道 (right ventricular outflow tract, RVOT) 狭窄、32例有室间隔缺损，1例有分流道血栓形成，12例有术后PA变形，10例有明显的右心室扩张，2例有RVOT动脉瘤，6例有导管钙化和狭窄。此外，对于LPA狭窄患者来说，发生RPA狭窄的几率比正常人高出6.5倍 ($p < 0.001$)。

结论。rToF后最常在CT上发现的并发症是PA狭窄和PA分支狭窄。PA狭窄和PA分支狭窄患者在年龄、人体测量数 (身高、体重和BSA) 和性别分布方面与是否存在不同狭窄类型 (PA、RPA或LPA) 无明显差异。然而，RPA狭窄会增加发生LPA狭窄的几率。

关键词：多排计算机断层扫描；法洛四联症；并发症；先天性心脏病；根治性矫正术。

引用本文：

Kabdullina AM, Sinitsyn VE, Rakhimzhanova RI, Dautov TB, Saduakassova AB, Kaliyev BB, Bastarbekova LA, Moldakhanova ZA. 电子计算机断层扫描确定的法洛四联症修复患儿各种心脏并发症的发生率. *Digital Diagnostics*. 2023;4(3):268–279. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD375285>

收到: 02.05.2023

接受: 09.06.2023

发布日期: 04.09.2023

Список сокращений

ВТПЖ — выходной тракт правого желудочка
ДМП — дефект межжелудочковой перегородки
КТ — компьютерная томография

МРТ — магнитно-резонансная томография
МСКТ — мультиспиральная компьютерная томография
ТФ — тетрада Фалло

ОБОСНОВАНИЕ

Тетрада Фалло (ТФ) составляет 7–10% всех случаев врождённых пороков сердца, встречается у 0,5/1000 живорождённых и является второй по частоте формой сложных врождённых пороков сердца [1]. Достижения в области диагностики, хирургического и послеоперационного лечения ТФ привели к тому, что всё большее число пациентов этой категории достигает зрелого возраста, при этом наблюдается резкое увеличение выживаемости (почти до 90%) к 30 годам [2], что требует длительного мониторинга определённых анатомических параметров для своевременного выявления осложнений.

После коррекции ТФ необходимо использовать средства визуализации для оценки объёма правого желудочка и перегрузки давлением вследствие трёхстворчатой и лёгочной регургитации или стеноза, для сканирования на предмет систолической и диастолической дисфункции правого и левого желудочков, наличия послеоперационных рубцов, аневризмы и фиброза правого желудочка, а также сопутствующих аномалий, таких как расширение корня аорты и аортальная недостаточность [1].

Неинвазивная визуализация играет важную роль в наблюдении за пациентами после коррекции ТФ. Трансторакальная эхокардиография является основным и рутинным инструментом клинического исследования для анатомической и функциональной оценки, необходимой в таких случаях, однако важно отметить, что её результаты во многом зависят от операторов оборудования. Компьютерную (КТ) и магнитно-резонансную (МРТ) томографию сердца обычно используют для этих целей в качестве дополнительных инструментов [3, 4].

Важнейшую роль в оценке сложных анатомических находок у пациентов с ТФ до и после коррекции играет мультиспиральная компьютерная томография (МСКТ), обладающая высоким пространственно-временным разрешением [2]. КТ сердца позволяет получить необходимую функциональную и анатомическую информацию для принятия обоснованных решений в сложных случаях врождённых пороков сердца. Для интерпретации изображений необходимы знания об общих подходах к оперативному лечению и остаточных гемодинамических нарушениях [5]. На сегодняшний день технический прогресс позволяет получать высококачественные снимки и заметно снижать дозу облучения при КТ сердца. При определённых показаниях технология может дать более полную информацию с меньшим риском по сравнению с другими

диагностическими методами, что может оказаться полезным при оценке ТФ [1]. МРТ сердца у маленьких детей, напротив, имеет ряд ограничений, в частности длительность исследования, требующую седации с сохранением сознания или общей анестезии, и относительно низкое пространственное разрешение, что отчасти объясняет малочисленность данных МРТ сердца у маленьких детей с ТФ в литературе. Кроме того, КТ не создаёт помех для кардиостимуляторов и дефибрилляторов, даже в старых моделях, несовместимых с МР-томографами.

Цель исследования — изучение частоты осложнений у пациентов детского возраста после радикальной коррекции ТФ, выявленных с помощью КТ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Дизайн исследования

Данное ретроспективное исследование проведено в высокоспециализированном госпитале третичного звена. КТ сердца проводили в рамках стандартной клинической практики с декабря 2011 по июнь 2020 года пациентам с коррекцией ТФ в анамнезе, проходившим лечение в отделениях кардиоторакальной хирургии и кардиологии.

Выполнен ретроспективный анализ данных 613 пациентов с ТФ. Из 613 проведённых КТ-исследований сердца 138 были выполнены до хирургического вмешательства, 25 — после паллиативной операции (шунтирование, установка стента в выходной тракт правого желудочка или расширение выходного тракта правого желудочка), 424 — после тотальной хирургической коррекции ТФ (закрытие дефекта межжелудочковой перегородки) и устранение обструкции выходного тракта правого желудочка), 26 — после замены клапана лёгочной артерии (состоящей из 4 этапов лечения).

По результатам КТ мы отобрали данные 116 пациентов (69 мужчин и 47 женщин) с осложнениями после радикальной коррекции ТФ. На момент операции средний возраст пациентов составлял от 10 до 36 (в среднем 12) месяцев, средняя масса тела 21 кг, средний рост 105,4 см, средняя площадь поверхности тела 0,74 м². Средний возраст пациентов на момент проведения КТ составил 17,5 (возрастной диапазон 7–36) лет (табл. 1).

Критерии соответствия

Из исследования были исключены пациенты со следующими заболеваниями: аллергия на йод; высокий уровень

Таблица 1. Общая характеристика пациентов ($n=116$)

Характеристика пациентов	Частота (в среднем)
Пол, n (%)	
Мужчины	69 (59)
Женщины	47 (41)
Возраст при первичной коррекции, мес	12 (10–36)
Предшествующее шунтирование, n (%)	25 (21,5)
Первичная коррекция	
Трансаннулярная пластика, n (%)	67 (57,7)
Миектомия/вальвулотомия, n (%)	40 (35,5)
Клапаносодержащий кондуит Contegra, n (%)	9 (7,7)
Масса тела, кг	21,08
Рост, см	105,4
Площадь поверхности тела, m^2	0,7

креатинина; взрослые пациенты с ТФ, не подвергавшейся коррекции ($n=4$). В дальнейшем применялись следующие критерии включения: наличие информированного согласия; предварительная коррекция ТФ.

Компьютерная томография сердца

Детям, перенёвшим паллиативные операции и коррекцию ТФ, сканирование проводилось на компьютерном томографе SOMATOM Definition AS 64 (Германия) в радиологическом отделении. Сканирование выполняли с проспективной кардиосинхронизацией и реконструкцией, толщиной среза 0,6 мм.

Все пациенты обследованы в положении лёжа, головой вперёд, с внутривенным болюсным введением препарата через автоматический бескамерный инжектор Ohiotandem со скоростью инфузии 1–2 мл/с.

Для седации младенцев и детей младшего возраста до 4 лет использовали перорально хлоралгидрат (75 мг/кг) и кетамин (1 мг/кг). Для детей старшего возраста и взрослых седация не применялась.

Для оптимизации дозы облучения при проведении КТ в нашем учреждении использовались стандартные протоколы, адаптированные к размерам тела. В их основу положены соотношения массы тела и размера сердечной тени, наблюдаемой на ориентировочных снимках, что позволило определить оптимальное произведение силы тока на время ротации трубки [6].

Этическая экспертиза

Исследование одобрено Комитетом по этике Национального исследовательского кардиохирургического центра (разрешение № 01-92/2021 от 22.04.2021). Предполагаемых рисков для участников не выявлено. В процессе сбора данных все персональные данные были закодированы и обезличены для защиты прав пациентов и предотвращения разглашения личной информации.

Исследователи имели доступ к электронной базе данных, содержащей только информацию о демографических и клинических характеристиках пациентов, которую анализировали и представляли в обобщённом виде, обеспечивая тем самым её конфиденциальность. Исследование проводилось в соответствии с принципами Хельсинкской декларации. Перед участием в исследовании от всех пациентов или их законных представителей было получено информированное согласие.

Статистический анализ

Описательные данные представлены в процентах (для категориальных переменных), при необходимости — как среднее значение $\pm$ стандартное отклонение или медиана (интерквартильный размах). Когорты были разделены на две группы: выжившие и умершие пациенты. Категориальные переменные сравнивали с помощью χ^2 -теста, непрерывные — с помощью t -теста или U -теста Манна–Уитни.

Сравнение между тремя группами проводилось посредством бивариационного анализа для нормально распределённых величин. С помощью такого же анализа оценивали связь между стенозом лёгочной артерии и другими переменными. Для оценки взаимосвязи между функциональными параметрами, исследованными в трёх различных группах, использовали коэффициент корреляции Пирсона или коэффициент ранговой корреляции Спирмена. p -Значения были двусторонними и считались значимыми при $<0,005$ во всех видах анализа.

Статистическую обработку данных выполняли с использованием программы SPSS (версия 24.0, IBM Corp.).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Объекты (участники) исследования

В ретроспективном исследовании, проведённом в период с октября 2011 по июнь 2020 года, приняли участие 613 пациентов с ТФ. По результатам КТ выявлены 116 пациентов с осложнениями после радикальной коррекции ТФ. У 49 пациентов после коррекции обнаружен стеноз лёгочной артерии (табл. 2), у 92 — стеноз ветвей лёгочной артерии, у 56 из них стеноз затрагивал основную ветвь левой лёгочной артерии (табл. 3), у 36 — основную ветвь правой лёгочной артерии (табл. 4). Кроме того, у 8 пациентов был диагностирован стеноз выходного тракта правого желудочка (ВТПЖ), у 32 — дефект межжелудочковой перегородки (ДМП), у 1 — тромбоз шунта, у 12 — послеоперационная деформация лёгочной артерии, у 10 — выраженная дилатация правого желудочка, у 2 — аневризма ВТПЖ, у 6 — кальцификация и стеноз кондуита (рис. 1).

На рис. 1 представлены снимки 12-летнего мальчика после коррекции ТФ, которому установили клапаносодержащий кондуит Contegra № 16 и двусторонние стенты Palmaz Genesis XD 19–10. КТ сердца чётко демонстрирует

Таблица 2. Сравнение медицинских характеристик пациентов с наличием и отсутствием стеноза лёгочной артерии ($n=116$)

Переменная	Нет ($n=67$)	Да ($n=49$)	p
Возраст, мес	28,5 (29,5)	24,6 (27)	0,48
Рост, см	107,1 (29,4)	103,1 (29,8)	0,47
Масса тела, кг	22,6 (17,4)	19 (12,9)	0,23
Площадь поверхности тела	0,75 (0,29)	0,72 (0,34)	0,5
Пол			0,14
Мужчины	36 (52,2%)	33 (47,8%)	
Женщины	31 (66%)	16 (34%)	
Паллиативная операция			0,8
Нет	52 (57,1%)	39 (42,9%)	
Да	15 (60%)	10 (40%)	
Тип тетрады Фалло			0,08
Стеноз лёгочной артерии	56 (55%)	46 (45%)	
Атрезия лёгочной артерии	11 (79%)	3 (21%)	
Тип операции			0,69
Трансаннулярная пластика	38 (56,7%)	29 (43,3%)	
Без трансаннулярной пластики	23 (56,1%)	18 (43,9%)	
Конduit	6 (75%)	2 (25%)	
Тромбоз шунта			0,58
Нет	66 (57,4%)	49 (42,6%)	
Да	1 (100%)	0	
Дефект межжелудочковой перегородки			0,84
Нет	49 (58,3%)	35 (41,7%)	
Да	18 (56,3%)	14 (43,7%)	
Стеноз выходного тракта правого желудочка			0,26
Нет	61 (56,5%)	47 (43,5%)	
Да	6 (75%)	2 (25%)	
Аневризма выходного тракта правого желудочка			0,33
Нет	65 (57%)	49 (43%)	
Да	2 (100%)	0	
Деформация лёгочной артерии			0,61
Нет	60 (58%)	44 (42,3%)	
Да	7 (58,3%)	5 (41,7%)	
Стеноз правой лёгочной артерии			0,93
Нет	46 (57,5%)	34 (42,5%)	
Да	21 (58,3%)	15 (41,7%)	
Стеноз левой лёгочной артерии			0,03*
Нет	29 (48,3%)	31 (51,7%)	
Да	38 (67,9%)	18 (32,1%)	
Расширение правого желудочка			0,58
Нет	61 (57,6%)	45 (42,4%)	
Да	6 (60%)	4 (40%)	
Кальцификация и стеноз кондуита			0,19
Нет	62 (56,4%)	48 (43,6%)	
Да	5 (83,3%)	1 (16,7%)	

Примечание. * Критерий хи-квадрат; $OШ_{\text{стенозЛЛА да}}=0,44$, т.е. отношение шансов (ОШ) развития стеноза лёгочной артерии у лиц со стенозом левой лёгочной артерии (ЛЛА) в 0,44 раза (56%) ниже, чем у тех, у кого стеноз левой лёгочной артерии не выявлен.

Таблица 3. Сравнение медицинских характеристик пациентов с наличием и отсутствием стеноза левой лёгочной артерии ($n=116$)

Переменная	Нет ($n=60$)	Да ($n=56$)	p
Возраст, мес	29,3 (32,2)	24,3 (24,1%)	0,35
Рост, см	108 (28,3)	102 (30,7)	0,3
Масса тела, кг	20,3 (12,4)	21,9 (18,7)	0,6
Площадь поверхности тела	0,76 (0,33)	0,72 (0,29)	0,46
Пол			0,1
Мужчины	40 (58%)	29 (42%)	
Женщины	20 (42,6%)	27 (57,4%)	
Паллиативная операция			0,35
Нет	45 (49,5%)	46 (50,5%)	
Да	15 (60%)	10 (40%)	
Тип тетрады Фалло			0,06
Стеноз лёгочной артерии	56 (55%)	46 (45%)	
Атрезия лёгочной артерии	4 (28,6%)	10 (71,4%)	
Тип операции			0,96
Трансаннулярная пластика	34 (50,8%)	33 (49,2%)	
Без трансаннулярной пластики	22 (53,7%)	19 (46,3%)	
Конduit	4 (50%)	4 (50%)	
Тромбоз шунта			0,52
Нет	59 (51,3%)	56 (48,7%)	
Да	1 (100%)	0	
Дефект межжелудочковой перегородки			0,024*
Нет	38 (45,2%)	46 (54,8%)	
Да	22 (68,8%)	10 (31,3)	
Стеноз выходного тракта правого желудочка			0,6
Нет	56 (51,8%)	52 (48,2%)	
Да	4 (50%)	4 (50%)	
Аневризма выходного тракта правого желудочка			0,23
Нет	60 (52,6%)	54 (47,4%)	
Да	0	2 (100%)	
Деформация лёгочной артерии			-
Нет	56 (53,8%)	48 (46,2%)	0,15
Да	4 (33,3%)	8 (66,7%)	
Расширение правого желудочка			0,42
Нет	54 (51%)	52 (49%)	
Да	6 (60%)	4 (40%)	
Кальцификация и стеноз кондуита			0,63
Нет	57 (51,8%)	53 (48,2%)	
Да	3 (50%)	3 (50%)	

Примечание. * Критерий хи-квадрат; $ОШ_{\text{ДМП да}}=0,38$, т.е. отношение шансов (ОШ) развития стеноза левой лёгочной артерии в 0,38 раза (62%) ниже для пациентов с дефектом межжелудочковой перегородки по сравнению с теми, у кого дефект межжелудочковой перегородки не выявлен.

Таблица 4. Сравнение медицинских характеристик пациентов с наличием и отсутствием стеноза правой лёгочной артерии (n=116)

Переменная	Нет (n=80)	Да (n=36)	p
Возраст, мес	26 (29,5)	28,7 (26,8)	0,64
Рост, см	107,8 (28,2)	100 (31,9)	0,19
Масса тела, кг	20 (12)	23,6 (22)	0,26
Площадь поверхности тела	0,75 (0,32)	0,72 (0,29)	0,61
Пол			0,32
Мужчины	50 (72,5%)	19 (27,5%)	
Женщины	30 (63,8%)	17 (36,2%)	
Паллиативная операция			0,35
Нет	64 (70,3%)	27 (29,7%)	
Да	16 (64%)	9 (36%)	
Тип тетрады Фалло			0,45
Стеноз лёгочной артерии	71 (69,6%)	31 (30,4%)	
Атрезия лёгочной артерии	9 (64,3%)	5 (35,7%)	
Тип операции			0,86
Трансаннулярная пластика	47 (70,2%)	20 (29,8%)	
Без трансаннулярной пластики	28 (68,3%)	13 (31,7%)	
Конduit	5 (62,5%)	3 (37,5%)	
Тромбоз шунта			0,69
Нет	79 (68,7%)	36 (31,3%)	
Да	1 (100%)	0	
Дефект межжелудочковой перегородки			0,68
Нет	57 (67,9%)	27 (32,1%)	
Да	23 (71,9%)	9 (28,1%)	
Стеноз выходного тракта правого желудочка			0,52
Нет	74 (68,5%)	34 (31,5%)	
Да	6 (75%)	2 (25%)	
Аневризма выходного тракта правого желудочка			0,09
Нет	80 (70,2%)	34 (29,8%)	
Да	0	2 (100%)	
Деформация лёгочной артерии			0,55
Нет	72 (69,2%)	32 (30,8%)	
Да	8 (66,7%)	4 (33,3%)	
Стеноз левой лёгочной артерии			<0,001*
Нет	52 (86,7%)	8 (13,3%)	
Да	28 (50%)	28 (50%)	
Расширение правого желудочка			0,62
Нет	73 (68,9%)	33 (31,1%)	
Да	7 (70%)	3 (30%)	
Кальцификация и стеноз кондуита			0,39
Нет	75 (68,2%)	35 (31,8%)	
Да	5 (83,3%)	1 (16,7%)	

Примечание. * Критерий хи-квадрат; $ОШ_{ЛЛА\ да} = 6,5$, т.е. отношение шансов (ОШ) развития стеноза правой лёгочной артерии в 6,5 раза (550%) выше у пациентов со стенозом левой лёгочной артерии (ЛЛА) в сравнении с теми, у кого стеноз левой лёгочной артерии не выявлен.

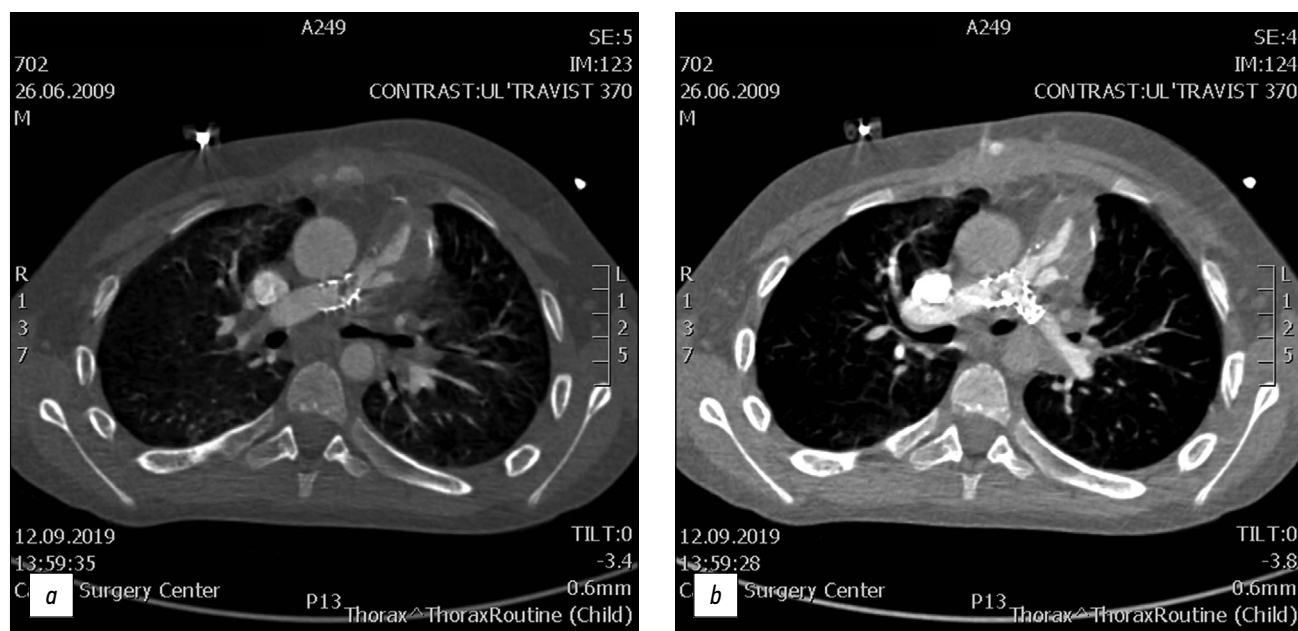


Рис. 1. Компьютерная томография клапаносодержащего кондуита Contegra № 16 (a) и двусторонних стентов Palmaz Genesis XD 19-10 (b).

тромбоз кондуита. Все осложнения, выявленные на КТ, подтверждены результатами ангиографии, после чего пациент был прооперирован.

Основные результаты исследования

Наиболее частые осложнения — стеноз лёгочной артерии и её ветвей. Мы решили сравнить медицинские характеристики пациентов со стенозом и без стеноза лёгочной артерии и её ветвей с помощью бивариационного анализа и оценки отношения шансов.

При сравнении трёх пар данных не выявлено существенных различий в возрасте, антропометрических параметрах (рост, вес, площадь поверхности тела) и гендерном распределении пациентов при наличии или отсутствии у них различных типов стеноза (лёгочной артерии, правой или левой лёгочной артерии). Кроме того, не выявлено значимых различий по типу ТФ, наличию тромбоза шунта и паллиативной операции, а также типу выполненного хирургического вмешательства ($p > 0,05$). Фактически данные групп сравнения были сопоставимы по вышеуказанным критериям.

Пациенты с ДМП имели более низкий риск развития стеноза левой лёгочной артерии [отношение шансов (ОШ) 0,039; 95% доверительный интервал (ДИ) 0,16–0,89; $p < 0,005$]. В то же время наличие ДМП не было связано с риском развития стеноза лёгочной артерии или её правой ветви ($p > 0,005$).

Как видно из табл. 2 и 3, значимых ассоциаций между наличием стеноза или аневризмы ВТПЖ и развитием стеноза лёгочной артерии, её правой или левой ветвей не обнаружено. Аналогичные результаты получены в отношении наличия или отсутствия деформации лёгочной артерии ($p > 0,005$).

Вероятность развития стеноза лёгочной артерии была достоверно ниже (ОШ 0,44; 95% ДИ 0,21–0,94; $p < 0,005$) у пациентов со стенозом левой, но не правой лёгочной артерии ($p > 0,005$). В то же время у пациентов со стенозом левой лёгочной артерии вероятность развития стеноза правой лёгочной артерии была в 6,5 раза выше (95% ДИ 2,62–16,15; $p < 0,001$).

Значимой связи между дилатацией правого желудочка или кальцификацией и стенозом кондуита и развитием стеноза лёгочной артерии, её левой или правой ветви не выявлено ($p > 0,005$).

ОБСУЖДЕНИЕ

Всё большее число взрослых пациентов с врождёнными пороками сердца нуждаются в пожизненном наблюдении посредством диагностической визуализации с использованием КТ и МРТ сердца. Для таких пациентов характерен большой спектр уникальных анатомических и функциональных изменений, возникших в результате одномоментной или многоэтапной паллиативной и хирургической коррекции. Рентгенологи, выполняющие диагностическую задачу по мониторингу эффекта лечения и выявлению возможных осложнений, должны знать типичные результаты КТ и МРТ сердца, наблюдаемые у взрослых пациентов после коррекции сложных форм врождённых пороков сердца [7].

Благодаря высокому пространственно-временному разрешению, а также возможности получения высококачественных трёхмерных реконструированных изображений, МСКТ стала основным методом исследования у ряда пациентов, преимущественно при оценке лёгочной артерии и основных аортолёгочных коллатеральных

артерий [8]. В данном исследовании обнаружено, что наиболее частыми осложнениями, возникающими после радикальной коррекции ТФ, являются стеноз лёгочной артерии и её ветвей.

Эхокардиография по-прежнему считается основным методом оценки послеоперационных осложнений у пациентов с врождёнными пороками сердца, что обусловлено её известными преимуществами: безопасностью, доступностью, отсутствием ионизирующего излучения, а также превосходными возможностями в визуализации внутрисердечной анатомии и физиологических функций сердца. Однако из-за зависимости результатов исследования от оператора и узкого акустического окна эхокардиография сопряжена с трудностями визуализации внесердечной анатомии, а также с рядом проблем при количественной оценке размеров, функций и клапанной регургитации правого желудочка [9].

КТ и МРТ сердца относятся к малоинвазивным методам оценки внесердечных послеоперационных сосудистых осложнений, однако КТ сердца превосходит по своим возможностям МРТ в аспектах распознавания внутрисердечных анатомических элементов, оценки анатомии мелких сосудов (включая лёгочные вены, дистальные ветви лёгочной артерии и аортопульмональные коллатерали), выявления функциональных и структурных аномалий или осложнений после хирургических вмешательств у пациентов с врождённым пороком сердца. Таким образом, КТ уверенно становится неоценимым средством визуализации, способным восполнить пробелы между эхокардиографией, катетеризацией сердца и МРТ сердца [10].

При хирургической коррекции ТФ используются различные типы кондуитов. Непосредственные послеоперационные результаты превосходны, но со временем возникает прогрессирующая обструкция кондуита из-за несоответствия анатомических особенностей пациента и протеза, стеноза дистального анастомоза, перекручивания кондуита, тромбоза и развития кальцификатов. МСКТ позволяет точно определить точный механизм обструкции кондуита, а также оценить уровень, степень и протяжённость стеноза [2].

Трансаннулярная пластика часто приводит к дилатации и аневризмам ВТПЖ, хронической и тяжёлой лёгочной регургитации, последующему расширению и дисфункции правого желудочка. Аневризма ВТПЖ — это выбухание стенки желудочка после реконструкции путей оттока из правого желудочка, которое считается независимым предиктором расширения правого желудочка и систолической дисфункции у пациентов, подвергшихся коррекции ТФ. На фоне аневризмы часто возникают желудочковые аритмии. МСКТ позволяет отчётливо визуализировать аневризмы ВТПЖ, а также сопутствующую дилатацию основной лёгочной артерии и её центральных ветвей. МСКТ отлично воспроизводит морфологию ВТПЖ и сердечные аномалии, связанные с лёгочной регургитацией, а также позволяет точно измерить увеличенные

объёмы правого желудочка, что служит одним из основных показателей для замены лёгочного клапана [2].

Ограничения исследования

Настоящее исследование имеет ряд ограничений. Во-первых, исследование носило ретроспективный характер, следовательно, размер выборки был невелик. Кроме того, поскольку исследование было наблюдательным, золотой стандарт для сравнения полученных результатов отсутствовал.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наше исследование показало, что наиболее частыми осложнениями у пациентов детского возраста после коррекции ТФ были стеноз лёгочной артерии и её ветвей. Пациенты с такими осложнениями не имели существенных различий по возрасту, антропометрическим данным (рост, вес, площадь поверхности тела) и гендерному распределению при наличии или отсутствии у них различных типов стеноза (лёгочной артерии, правой или левой её ветви), однако отмечено, что наличие стеноза правой лёгочной артерии повышает вероятность развития стеноза левой лёгочной артерии.

МСКТ — исключительно полезный метод визуализации для оценки нормальных и аномальных результатов после хирургической коррекции ТФ благодаря широкой доступности и высокому пространственно-временному разрешению получаемых изображений. МСКТ всё чаще используется для оценки пациентов с ТФ, так как позволяет достоверно и точно оценить сложную анатомию и сопутствующие аномалии у пациентов, не подвергавшихся коррекции ТФ, а также определиться с хирургической тактикой и необходимым типом операции. Помимо этого, МСКТ дала нам возможность в полной мере понять и оценить поздние последствия хирургического вмешательства, послеоперационные осложнения и остаточные поражения. Именно поэтому в настоящее время крайне важно проводить регулярное наблюдение за пациентами, перенёвшими коррекцию ТФ, для оценки наличия остаточных явлений и послеоперационных осложнений с целью их своевременного и эффективного лечения.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение поисково-аналитической работы и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распределён следующим образом: Р.И. Рахимжанова,

Т.Б. Даутов — концепция и дизайн работы; А.М. Кабдуллина, Б.Б. Калиев, Л.А. Бастарбекова, З.А. Молдаханова — сбор и анализ данных; А.Б. Садуакасова, А.М. Кабдуллина — интерпретация результатов, В.Е. Синицын — утверждение окончательного варианта рукописи.

Благодарности. Авторы выражают благодарность руководителю Национального научного кардиохирургического центра, д.м.н. профессору Ю.В. Пя за предоставленную возможность выполнить данную работу.

ADDITIONAL INFORMATION

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Apostolopoulou S.C., Manginas A., Kelekis N.L., Noutsias M. Cardiovascular imaging approach in pre and postoperative tetralogy of Fallot // *BMC Cardiovasc Dis.* 2019. Vol. 19, N 1. P. 7. doi: 10.1186/s12872-018-0996-9
2. Shaaban M., Tantawy S., Elkafrawy F., et al. Multi-detector computed tomography in the assessment of tetralogy of Fallot patients: Is it a must? // *Egyptian Heart J.* 2020. Vol. 72, N 1. P. 17. doi: 10.1186/s43044-020-00047-3
3. Goo H.W. Changes in right ventricular volume, volume load, and function measured with cardiac computed tomography over the entire time course of tetralogy of Fallot // *Korean J Radiol.* 2019. Vol. 20, N 6. P. 956–966. doi: 10.3348/kjr.2018.0891
4. Stout K.K., Daniels C.J., Aboulhosn J.A., et al. 2018 AHA/ACC Guideline for the management of adults with congenital heart disease: Executive summary: A report of the American College of Cardiology / American Heart Association Task Force on Clinical Practice Guidelines // *J Am College Cardiol.* 2019. Vol. 73, N 12. P. 1494–1563. doi: 10.1016/j.jacc.2018.08.1028
5. Chelliah A., Shah A.M., Farooqi K.M., Einstein A.J. Cardiovascular CT in cyanotic congenital heart disease // *Curr Cardiovasc Imaging Rep.* 2019. Vol. 12, N 7. P. 30. doi: 10.1007/s12410-019-9507-3

REFERENCES

1. Apostolopoulou SC, Manginas A, Kelekis NL, Noutsias M. Cardiovascular imaging approach in pre and postoperative tetralogy of Fallot. *BMC Cardiovasc Dis.* 2019;19(1):7. doi: 10.1186/s12872-018-0996-9
2. Shaaban M, Tantawy S, Elkafrawy F, et al. Multi-detector computed tomography in the assessment of tetralogy of Fallot patients: Is it a must? *Egyptian Heart J.* 2020;72(1):17. doi: 10.1186/s43044-020-00047-3
3. Goo HW. Changes in right ventricular volume, volume load, and function measured with cardiac computed tomography over the entire time course of tetralogy of Fallot. *Korean J Radiol.* 2019;20(6):956–966. doi: 10.3348/kjr.2018.0891
4. Stout KK, Daniels CJ, Aboulhosn JA, et al. 2018 AHA/ACC Guideline for the management of adults with congenital heart disease: Executive summary: A report of the American College of Cardiology / American Heart Association Task Force on Clinical

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work. R.I. Rakhimzhanova, T.B. Dautov — conception and design of the work; A.M. Kabdullina, B.B. Kaliyev, L.A. Bastarbekova, Zh.A. Moldakhanova — acquisition, analysis of data; A.M. Kabdullina, A.B. Saduakassova — interpretation of data; V.E. Sinitsyn — approved the final version of the work.

Acknowledgments. We thank the Chief of the National Research Cardiac Surgery Center MD Ph.D. professor Yuriy V. Pya for the opportunity to carry out this work.

6. Goo H.W. Comparison of chest pain protocols for electrocardiography-gated dual-source cardiothoracic CT in children and adults: The effect of tube current saturation on radiation dose reduction // *Korean J Radiol.* 2018. Vol. 19, N 1. P. 23–31. doi: 10.3348/kjr.2018.19.1.23
7. Siripornpitak S., Goo H.W. CT and MRI for repaired complex adult congenital heart diseases // *Korean J Radiol.* 2021. Vol. 22, N 3. P. 308–323. doi: 10.3348/kjr.2020.0895
8. Singh R., Jain N., Kumar S., Garg N. Multi-detector computed tomography angiographic evaluation of right ventricular outflow tract obstruction and other associated cardiovascular anomalies in tetralogy of Fallot patients // *Polish J Radiol.* 2019. Vol. 84. P. 511–516. doi: 10.5114/pjr.2019.91203
9. Kossaiy A. Echocardiographic assessment of the right ventricle, from the conventional approach to speckle tracking and three-dimensional imaging, and insights into the «Right Way» to explore the forgotten chamber // *Clin Med Insights Cardiol.* 2015. Vol. 9. P. 65–75. doi: 10.4137/CMC.S27462
10. Pushparajah K., Duong P., Mathur S., Babu-Narayan S.V. Cardiovascular MRI and CT in congenital heart disease // *Echo Res Pract.* 2019. Vol. 6, N 4. P. R121–138. doi: 10.1530/ERP-19-0048

Practice Guidelines. *J Am College Cardiol.* 2019;73(12):1494–1563. doi: 10.1016/j.jacc.2018.08.1028

5. Chelliah A, Shah AM, Farooqi KM, Einstein AJ. Cardiovascular CT in cyanotic congenital heart disease. *Curr Cardiovasc Imaging Rep.* 2019;12(7):30. doi: 10.1007/s12410-019-9507-3
6. Goo HW. Comparison of chest pain protocols for electrocardiography-gated dual-source cardiothoracic CT in children and adults: The effect of tube current saturation on radiation dose reduction. *Korean J Radiol.* 2018;19(1):23–31. doi: 10.3348/kjr.2018.19.1.23
7. Siripornpitak S, Goo HW. CT and MRI for repaired complex adult congenital heart diseases. *Korean J Radiol.* 2021;22(3):308–323. doi: 10.3348/kjr.2020.0895
8. Singh R, Jain N, Kumar S, Garg N. Multi-detector computed tomography angiographic evaluation of right ventricular outflow tract obstruction and other associated cardiovascular anomalies

in tetralogy of Fallot patients. *Polish J Radiol.* 2019;84:511–516. doi: 10.5114/pjr.2019.91203

9. Kossaify A. Echocardiographic assessment of the right ventricle, from the conventional approach to speckle tracking and three-dimensional imaging, and insights into the “Right Way” to explore

the forgotten chamber. *Clin Med Insights Cardiol.* 2015;9:65–75. doi: 10.4137/CMC.S27462

10. Pushparajah K, Duong P, Mathur S, Babu-Narayan SV. Cardiovascular MRI and CT in congenital heart disease. *Echo Res Pract.* 2019;6(4):R121–138. doi: 10.1530/ERP-19-0048

ОБ АВТОРАХ

* **Кабдуллина Ажар Муслымкановна,**

адрес: Казахстан, 01000, Астана, ул. Бейбитшилик, д. 49А;

ORCID: 0000-0003-0521-5484;

eLibrary SPIN: 4169-1761;

e-mail: azharazh@mail.ru

Синицын Валентин Евгеньевич; д-р мед. наук, профессор;

ORCID: 0000-0002-5649-2193;

eLibrary SPIN: 8449-6590;

e-mail: vsini@mail.ru

Рахимжанова Раушан Ибжановна; д-р мед. наук, профессор;

ORCID: 0000-0002-3490-6324;

e-mail: rakhimzhanova01@rambler.ru

Даутов Таирхан Бекполатович; д-р мед. наук, профессор;

ORCID: 0000-0002-5267-0108;

e-mail: tairkhan.dautov@mail.ru

Садуакасова Айгуль Болатовна; д-р мед. наук;

ORCID: 0000-0001-7089-5696;

e-mail: sadik.a@mail.ru

Калиев Бауржан Бахытович;

ORCID: 0000-0003-4825-749X;

e-mail: Baur233113@mail.ru

Бастарбекова Лаззат Абылхановна;

ORCID: 0000-0001-8246-4754;

eLibrary SPIN: 8634-6601;

e-mail: lbastarbekova@mail.ru

Молдаханова Жанар Акбергенова;

ORCID: 0000-0002-5980-9563;

e-mail: moldahanova1991@mail.ru

AUTHORS' INFO

* **Azhar M. Kabdullina;**

address: 49A Beybitshilik street, 01000 Astana, Kazakhstan;

ORCID: 0000-0003-0521-5484;

eLibrary SPIN: 4169-1761;

e-mail: azharazh@mail.ru

Valentin E. Sinityn, MD, Dr. Sci. (Med.), Professor;

ORCID: 0000-0002-5649-2193;

eLibrary SPIN: 8449-6590;

e-mail: vsini@mail.ru

Raushan I. Rakhimzhanova, MD, Dr. Sci. (Med.), Professor;

ORCID: 0000-0002-3490-6324;

e-mail: rakhimzhanova01@rambler.ru

Tairkhan B. Dautov, MD, Dr. Sci. (Med.), Professor;

ORCID: 0000-0002-5267-0108;

e-mail: tairkhan.dautov@mail.ru

Aigul B. Saduakassova, MD, Dr. Sci. (Med.);

ORCID: 0000-0001-7089-5696;

e-mail: sadik.a@mail.ru

Bauyrzhan B. Kaliyev;

ORCID: 0000-0003-4825-749X;

e-mail: Baur233113@mail.ru

Lyazzat A. Bastarbekova;

ORCID: 0000-0001-8246-4754;

eLibrary SPIN: 8634-6601;

e-mail: lbastarbekova@mail.ru

Zhanar A. Moldakhanova;

ORCID: 0000-0002-5980-9563;

e-mail: moldahanova1991@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD494103>

Магнитно-резонансная томография сердца у пациентов, переболевших коронавирусной инфекцией (COVID-19)

А.С. Максимова, Н.И. Рюмшина, Т.А. Шелковникова, О.В. Мочула,
Н.Д. Анфиногенова, В.Ю. Усов

Томский национальный исследовательский медицинский центр, Научно-исследовательский институт кардиологии,
Томск, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Нередким осложнением коронавирусной инфекции (COVID-19) является миокардит.

Цель — сравнить различные паттерны повреждения миокарда у пациентов, перенёсших COVID-19, и пациентов допандемического периода по данным магнитно-резонансной томографии сердца с парамагнитным контрастным усилением.

Материалы и методы. В ретроспективное исследование включено 47 пациентов, которым выполняли магнитно-резонансную томографию сердца с парамагнитным контрастным усилением для исключения острого миокардита. В группу 1 вошли 34 пациента с перенесённой коронавирусной инфекцией, подтверждённой результатами исследования мазка со слизистой носоглотки методом полимеразной цепной реакции, в группу 2 — 13 человек, магнитно-резонансную томографию сердца которым проводили до начала пандемии коронавирусной инфекции (2017 г.).

Результаты. Средняя продолжительность от появления жалоб до проведения магнитно-резонансной томографии составила 166 дней. Снижение толерантности к физическим нагрузкам обнаружено у 77% пациентов, боль в области сердца, одышка и сердцебиение — у 14 (42%), 30 (88%) и 28 (85%) пациентов группы 1 соответственно. В группе 2 отмечены одышка у 4 (30%) пациентов, боли в области сердца — у 9 (69%), сердцебиение и/или ощущение ритма сердца — у 6 (46%). У пациентов группы 1 поражение миокарда носило более распространённый характер, из них у 1/3 сохранялись усиление лёгочного рисунка и выпот в плевральную полость. В группе 1 мужчины имели более низкую фракцию выброса левого желудочка, меньшие показатели глобальной продольной деформации и более высокие функциональные показатели левого предсердия ($p < 0,05$). У женщин статистические различия отмечались только по количеству поражённых сегментов миокарда левого желудочка.

Заключение. Вирус SARS-CoV-2 вызывает распространённое поражение сердца с вовлечением значительного количества сегментов миокарда. Среди мужчин достоверно чаще развиваются поствоспалительные осложнения в виде нарушения сократительной функции левого желудочка и левого предсердия. Полученные результаты указывают на необходимость дальнейшей оценки долгосрочных последствий перенесённого COVID-19 на сердечно-сосудистую систему. Магнитно-резонансная томография сердца с контрастированием в данном случае может быть чувствительным инструментом визуализации для выявления тяжести поражения сердца.

Ключевые слова: магнитно-резонансная томография; сердце; коронавирусная инфекция; COVID-19; миокардит; левое предсердие.

Как цитировать:

Максимова А.С., Рюмшина Н.И., Шелковникова Т.А., Мочула О.В., Анфиногенова Н.Д., Усов В.Ю. Магнитно-резонансная томография сердца у пациентов, переболевших коронавирусной инфекцией (COVID-19) // *Digital Diagnostics*. 2023. Т. 4, № 3. С. 280–291. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD494103>

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD494103>

Cardiac magnetic resonance imaging in patients with history of COVID-19

Aleksandra S. Maksimova, Nadezhda I. Ryumshina, Tatiana A. Shelkovnikova, Olga V. Mochula, Nina D. Anfinogenova, Wladimir Yu. Ussov

Tomsk National Research Medical Center, Cardiology Research Institute, Tomsk, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: Myocarditis is among the most common complications arising from coronavirus infection (COVID-19).

AIM: This study aims to find the differences in the patterns of myocardial injury between patients who had COVID-19 and those from the pre-pandemic period, as determined by contrast-enhanced cardiac magnetic resonance imaging.

MATERIALS AND METHODS: The study encompassed a retrospective analysis of 47 patients who underwent contrast-enhanced cardiac magnetic resonance imaging to rule out acute myocarditis. Group 1 comprised 34 patients with a confirmed history of COVID-19 through PCR testing (nasal and/or throat swabs), while Group 2 comprised 13 individuals who underwent contrast-enhanced cardiac magnetic resonance imaging in 2017 prior to the onset of the COVID-19 pandemic. All patients enrolled in the study had clinical manifestation of cardiac injury without signs of coronary artery disease as an underlying cause of condition.

RESULTS: The mean time from the onset of heart symptoms to the administration of contrast-enhanced cardiac magnetic resonance imaging was 166 days. In group 1, a decrease in exercise tolerance was observed in 77% of patients, and 14 (42%), 30 (88%), and 28 (85%) of patients complained of chest pain, shortness of breath, and heart palpitations, respectively. In group 2, four patients (30%) had dyspnea, nine patients (69%) complained of chest pain, and six patients (46%) had heart palpitations and/or feeling of arrhythmia. Myocardial injury in group 1 was more generalized. The third of them had displayed preserved increased pulmonary vascularity and pleural effusion. Within group 1, men had significantly lower left ventricular ejection fraction, lower values of global longitudinal deformation, and higher values of left atrial function compared with the corresponding parameters in women. Differences in women were found only in the number of the affected segments in the left ventricular myocardium.

CONCLUSION: SARS-CoV-2 virus caused extended myocardial injury, affecting a significant number of myocardial segments. Men had more frequent postinflammatory complications, characterized by abnormal function of the left ventricle and left atrium. Obtained results require continuous efforts for further assessment of long-term consequences of previous COVID-19 to the cardiovascular system. In this regard, contrast-enhanced cardiac magnetic resonance imaging may represent a sensitive imaging tool for the assessment of cardiac injury severity.

Keywords: magnetic resonance imaging; heart; coronavirus infection; COVID-19; myocarditis; left atrium.

To cite this article:

Maksimova AS, Ryumshina NI, Shelkovnikova TA, Mochula OV, Anfinogenova ND, Ussov WYu. Cardiac magnetic resonance imaging in patients with history of COVID-19. *Digital Diagnostics*. 2023;4(3):280–291. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD494103>

Received: 16.06.2023

Accepted: 10.07.2023

Published: 23.08.2023

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD494103>

患过冠状病毒感染 (COVID-19) 患者的心脏磁共振成像

Aleksandra S. Maksimova, Nadezhda I. Ryumshina, Tatiana A. Shelkovnikova,
Olga V. Mochula, Nina D. Anfinogenova, Wladimir Yu. Ussov

Tomsk National Research Medical Center, Cardiology Research Institute, Tomsk, Russian Federation

简评

论证。心肌炎是冠状病毒感染 (COVID-19) 的一种不罕见并发症。

该研究的目的是通过顺磁对比剂增强的心脏磁共振成像，比较患过COVID-19和大流行前患者心肌损伤的不同模式。

材料和方法。一项回顾性研究纳入了47名接受顺磁对比剂增强心脏磁共振成像检查来排除急性心肌炎的患者。第1组包括34名通过鼻咽和/或口咽粘膜涂片聚合酶链反应分析证实曾患过冠状病毒感染的患者，第2组包括13名在冠状病毒大流行 (2017年) 前接受心脏磁共振成像检查的患者。

结果。从发病到磁共振成像的平均时间为166天。在第一组中，77%的患者运动耐量降低了，分别有14 (42%)、30 (88%) 和28 (85%) 名患者出现了心脏疼痛、呼吸困难和心悸。在第2组中，有4名患者 (30%) 出现了呼吸困难，有9名患者 (69%) 出现了心脏疼痛，有6名患者 (46%) 出现了心悸和/或心律不齐。心肌损伤在第1组患者中更为普遍，其中1/3患者有持续性肺强化和胸腔积液。在第1组中，男性的左心室射血分数较低，整体纵向应变较低，左心房功能较高 ($p < 0,05$)。对于女性病人来说，仅在左心室心肌受影响节段的数量上存在统计上的差异。

结论。SARS-CoV-2病毒导致广泛的心脏损伤，累及大量心肌节段。对于男性病人来说，更容易出现左心室和左心房收缩功能障碍等炎症后并发症。结果表明，有必要进一步评估COVID-19对心血管系统的长期影响。在这种情况下，带有对比剂的心脏磁共振成像可能是检测心脏损伤严重程度的灵敏成像工具。

关键词：磁共振成像；心脏；冠状病毒感染；COVID-19；心肌炎；左心房。

引用本文：

Maksimova AS, Ryumshina NI, Shelkovnikova TA, Mochula OV, Anfinogenova ND, Ussov WYu. 患过冠状病毒感染 (COVID-19) 患者的心脏磁共振成像. *Digital Diagnostics*. 2023;4(3):280–291. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD494103>

收到: 16.06.2023

接受: 10.07.2023

发布日期: 23.08.2023

Список сокращений

КДО — конечно-диастолический объём

КСИ — конечно-систолический индекс

КСО — конечно-систолический объём

ЛП — левое предсердие

ЛЖ — левый желудочек

MPT — магнитно-резонансная томография

ППТ — площадь поверхности тела

ФВ — фракция выброса

LAV (left atrial volume) — объём левого предсердия

LAVi (left atrium volume index) — индекс объёма левого предсердия

LGE (late gadolinium enhancement) — отсроченное контрастное усиление

ОБОСНОВАНИЕ

Инфекция SARS-CoV-2 и вызванный ею COVID-19 стали всемирной пандемией с марта 2020 года. Несмотря на то, что в первую очередь поражается дыхательная система [1], и основной акцент направлен на респираторные осложнения, влияние новой коронавирусной инфекции на сердечно-сосудистую систему колоссально и затрагивает преимущественно пациентов с ранее существовавшей сердечно-сосудистой патологией [2]. Повреждение миокарда может произойти на любой стадии заболевания COVID-19 — вирусной, лёгочной, воспалительной фазе и фазе выздоровления, на поздних сроках после появления симптомов [3]. Доказано, что пациенты с COVID-19 подвержены риску развития аритмий, сердечной недостаточности, миокардита [4]. Механизмы повреждения сердца при SARS-CoV-2 многочисленны и до конца не изучены.

Наиболее частым осложнением коронавирусной инфекции является миокардит. Как правило, клиническая картина миокардита варьирует от лёгких симптомов, таких как усталость и одышка, до молниеносного течения с сердечной недостаточностью и кардиогенным шоком [5]. Визуальная диагностика играет решающую роль в характеристике различных аспектов повреждения миокарда, позволяет поставить точный диагноз и начать лечение на ранней стадии. Магнитно-резонансная томография (MPT) сердца с контрастированием рекомендована Российским и Европейским обществом кардиологов как высокоинформативный неинвазивный инструментальный метод диагностики миокардита, обеспечивающий детальную анатомическую визуализацию и оценку функциональных нарушений сердца [6, 7].

На сегодняшний день Всемирная организация здравоохранения отменила статус пандемии для коронавирусной инфекции (COVID-19), но при этом отсроченные негативные последствия пандемии только набирают активность в виде серьёзных осложнений, в том числе со стороны сердечно-сосудистой системы. Именно поэтому исследования состояния миокарда после COVID-19 не теряют своей актуальности и требуют дальнейшего изучения [8]. Кроме того, разные дизайны исследований, критерии включения/исключения, различия в методологии

получения изображений, анализе, интерпретации и отчётности об изменениях MPT сердца играют важную роль в большой неоднородности публикуемых результатов.

Цель исследования — сравнить различные паттерны повреждения миокарда у пациентов, перенёвших коронавирусную инфекцию COVID-19, и пациентов допандемического периода по данным MPT сердца с контрастированием.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Дизайн исследования

Ретроспективное исследование выполняли в соответствии со стандартами надлежащей клинической практики (Good Clinical Practice) и принципами Хельсинкской декларации.

Условия проведения

Исследование проводили на базе отделения рентгеновских и томографических методов диагностики НИИ кардиологии ФГБНУ «Томский национальный исследовательский медицинский центр» Российской академии наук. Все пациенты подписывали информированное согласие на проведение MPT-исследования сердца с парамагнитным контрастным усилением.

Критерии соответствия

Критерии включения в группу 1: наличие ранее подтверждённой инфекции SARS-CoV-2 по данным теста полимеразной цепной реакции; отсутствие симптомов острой респираторной инфекции на момент проведения MPT сердца; отрицательный результат теста полимеразной цепной реакции на COVID-19; объективные признаки поражения сердца, сопровождающиеся клиническими проявлениями, но без данных за ишемическую болезнь сердца (боль/дискомфорт в груди, ощущение сердцебиения, одышка); средняя продолжительность от появления жалоб до проведения MPT $166 \pm 17,4$ дней.

Критерии включения в группу 2: объективные признаки поражения сердца, сопровождающиеся клиническими проявлениями, но без данных за ишемическую болезнь сердца как причину возникновения данных симптомов (боль/дискомфорт в груди, ощущение сердцебиения,

одышка); проведение МРТ сердца в период до пандемии COVID-19 (2017 г.).

Критерии исключения для обеих групп: наличие в анамнезе инфаркта миокарда; низкое качество изображений МРТ сердца, затрудняющее анализ.

Протокол магнитно-резонансной томографии сердца

МРТ сердца с парамагнитным контрастным усилением выполняли на МР-томографе Vantage Titan (Toshiba, Япония) с индукцией магнитного поля 1,5 Тл с синхронизацией по электрокардиограмме и дыханию. Получали изображения миокарда по короткой и длинным осям до и после контрастного усиления. В качестве контрастного препарата-парамагнетика использовался 0,5 М Гадобутрол: выполнялось внутривенное введение в дозе 0,1 мл на 1 кг массы тела пациента. Толщина срезов составила 10 мм без промежутков между ними с записью в матрицу 256×256. Стандартный протокол МРТ-исследования сердца включал T1-, T2-взвешенные последовательности, последовательность с подавлением сигнала от жировой ткани для оценки состояния миокарда; динамические SSFP-последовательности для оценки объёмов и функции левого желудочка (ЛЖ); градиентные последовательности инверсия-восстановление (inversion-recovery, GR-IR) для определения участков патологического контрастирования. Подборку времени инверсии (time of inversion, TI) выполняли индивидуально (в среднем TI=300±10 мс). Оценку изменённых участков в миокарде осуществляли с учётом рекомендованной 17-сегментарной модели топической характеристики миокарда ЛЖ.

Анализ МРТ-изображений сердца проводили с использованием программного продукта cvi42 (Circle Cardiovascular Imaging, Calgary, Канада) на базе Центра коллективного пользования «Медицинская геномика». Для диагностики миокардита использовали рекомендованные критерии Lake—Louise: большие — наличие отёка, гиперемии, регионарного фиброза; малые — наличие перикардального выпота или гиперинтенсивный сигнал от перикарда, нарушение локальной сократимости миокарда ЛЖ [9]. Коэффициент отёка миокарда (edema ratio, ER) определяли как отношение интенсивности сигнала миокарда к сигналу скелетных мышц на T2-ВИ (T2-взвешенные изображения). Если значение ER превышало 2,0, то это расценивали как признак наличия отёка миокарда. Оценивали степень относительного накопления парамагнитного контрастного препарата (гиперемия) на T1-ВИ в нижнебоковых сегментах ЛЖ как наиболее часто подвергающихся воспалительным изменениям. Если относительное накопление превышало 4,0, то это расценивали как признак наличия гиперемии миокарда.

Оценивали наличие и характер (субэндокардиальный, субэпикардиальный, интрамуральный) отсроченного контрастирования (late gadolinium enhancement, LGE) и количество вовлечённых сегментов. Параметры

функционального состояния левого и правого желудочков рассчитывали автоматически по контурам эндокарда и эпикарда. Функциональные параметры включали конечно-диастолический объём (КДО), конечно-систолический объём (КСО), фракцию выброса (ФВ), глобальную радиальную и продольную деформацию ЛЖ; минимальные и максимальные объёмы левого и правого предсердия. На основании проведённых измерений рассчитывали следующие показатели:

- индекс объёма левого предсердия (LAVi, мл/м²) = объём ЛП/ППТ, где ЛП — левое предсердие; ППТ — площадь поверхности тела;
 - конечно-диастолический индекс (КДИ): КДИ = КДО/ППТ;
 - конечно-систолический индекс (КСИ): КСИ = КСО/ППТ.
- Рассчитывали функциональные показатели ЛП по формулам:

- фракция опорожнения ЛП (ФО ЛП) = ((LAVmax - LAVmin) / LAVmax) × 100%;
- индекс растяжимости ЛП = ((LAVmax - LAVmin) / LAVmin) × 100% [10].

Кроме этого, оценивали наличие перикардального выпота, выпота в плевральные полости и уплотнение лёгочного рисунка.

Статистическая обработка

Статистический анализ выполняли с использованием программного пакета STATISTICA 10. Категориальные переменные представлены в виде абсолютных (*n*) и относительных (%) частот. Непрерывные переменные представлены в виде среднего (*m*) и стандартного отклонения (SD) или медианы (Me) и межквартильного интервала [Q1; Q3]. Соответствие нормальному распределению признаков оценивали с помощью критерия Шапиро—Уилка. Сравнение между двумя группами проводили с использованием непарного *t*-критерия Стьюдента (для нормального распределения) или *U*-критерия Манна—Уитни (для распределения, отличного от нормального) для непрерывных переменных или критерия χ^2 для категориальных данных. Значение *p* < 0,05 считали статистически значимым.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Объекты (участники) исследования

В исследование включено 47 пациентов, которым выполняли МРТ сердца с контрастным усилением для исключения острого миокардита. В группу 1 вошли 34 пациента с перенесённой коронавирусной инфекцией, подтверждённой результатами исследования мазка со слизистой носо- и/или ротоглотки методом полимеразной цепной реакции; в группу 2 — 13 человек, которым МРТ сердца проводили по направлению кардиолога до начала пандемии коронавирусной инфекции (2017 г.). Клиническая характеристика пациентов, показатели МРТ сердца исследуемой группы представлены в табл. 1. Пациенты основной

Таблица 1. Клиническая характеристика и параметры магнитно-резонансной томографии сердца у пациентов, переболевших COVID-19, и контрольной группы лиц

Показатель	Группа 1 COVID-19(+) n=34	Группа 2 COVID-19(-) n=13	p
Возраст, лет	62,5 [55; 66]	52 [45; 65]	0,07
Мужской пол, n (%)	12 (35,3)	6 (46,1)	0,49
Индекс массы тела, кг/м ²	30,69±5,22	27,75±4,05	0,08
Площадь поверхности тела, м ²	1,95±0,27	1,97±0,17	0,15
Частота сердечных сокращений, уд./мин	72,73±8,75	78±21,6	0,23
Сопутствующие заболевания, n (%):			
• гипертоническая болезнь	17 (50)	7 (53)	0,81
• сахарный диабет	2 (5)	0	0,37
• ишемическая болезнь сердца	8 (23)	4 (30)	0,61
• хроническая обструктивная болезнь лёгких	9 (26)	1 (7)	0,16
Сердечные симптомы, n (%):			
• боль в области сердца	14 (42)	4 (30)	0,51
• сердцебиение	30 (88)	9 (69)	0,12
• одышка	28 (85)	6 (46)	0,01*
• снижение толерантности к физическим нагрузкам	26 (77)	5 (39)	0,01*
ФВ ЛЖ, %	55,07±19,34	63,31±4,9	0,14
КДО ЛЖ, мл	113 [94,7; 153,8]	135,6 [116,72; 167,79]	0,98
КСО ЛЖ, мл	41 [28,9; 83]	50,87 [46,85; 63,04]	0,31
КДИ ЛЖ, мл/м ²	61,5 [48,2; 72,6]	69,5 [62,1; 79,9]	0,13
КСИ ЛЖ, мл/м ²	22,7 [16,4; 45,7]	26,1 [23,1; 30,6]	0,39
ER	1,5±0,36	1,58±0,39	0,54
Отёк визуально, n (%)	5 (14,7)	0 (0)	0,14
LGE, n (%)	33 (97)	12 (92,3)	0,47
Количество сегментов LGE	6,79±2,36	3,25±1,48	0,000*
Выпот в перикард, n (%)	22 (64,7)	5 (38)	0,10
Выпот в плевральные полости, n (%)	10 (29,4)	0 (0)	0,03*
Уплотнение лёгочного рисунка, n (%)	12 (35,3)	0 (0)	0,01*
GRS LV, %	17,52±9,61	16,86±5,54	0,82
GLS LV, %	-10,51±5,49	-10,96±2,66	0,78
Индекс усиления T1-ВИ нижнебокового сегмента базального отдела	1,54±0,29	1,71±0,53	0,17
Индекс усиления T1-ВИ нижнебокового сегмента среднего отдела	1,53±0,29	1,51±0,5	0,89
Индекс усиления T1-ВИ бокового сегмента апикального отдела	1,55±0,34	1,38±0,33	0,13
LAV max, мл	72,39 [56,3; 110,15]	57,80 [51,84; 96,6]	0,32
LAV min, мл	35,44 [18,47; 62,09]	21,35 [19,0; 42,07]	0,49
RAV max, мл	35,205 [31,08; 53,11]	40,2 [31,8; 51,095]	0,68
RAV min, мл	66,47 [55,96; 96,75]	84,945 [66,14; 93,305]	0,30
LAVi, мл/м ²	39,13 [32,09; 51,09]	27,8 [27,2; 43,89]	0,17
ФО ЛП, %	53,55 [37,26; 163,32]	61,22 [55,35; 64,51]	0,13
ИР ЛП, %	115,28 [59,39; 163,32]	149,7 [121,74; 173,93]	0,30

Примечание. * p < 0,05. ФВ ЛЖ — фракция выброса левого желудочка; КДО — конечно-диастолический объём; КСО — конечно-систолический объём; КДИ — конечно-диастолический индекс; КСИ — конечно-систолический индекс; ER (edema ratio) — коэффициент отёка миокарда; LGE (late gadolinium enhancement) — отсроченное контрастное усиление; GRS LV (global radial strain left ventricular) — глобальная радиальная деформация левого желудочка; GLS LV (global longitudinal strain left ventricular) — глобальная продольная деформация левого желудочка; T1-ВИ — T1-взвешенные изображения; LAV (left atrial volume) — объём левого предсердия; RAV (right atrium volume) — объём правого предсердия; LAVi (left atrium volume index) — индекс объёма левого предсердия; ФО ЛП — фракция опорожнения левого предсердия; ИР ЛП — индекс растяжимости левого предсердия.

и контрольной групп были сопоставимы по полу, возрасту, индексу массы тела. Снижение толерантности к физическим нагрузкам фиксировали у 77% пациентов, боль в области сердца, одышку и сердцебиение — у 14 (42%), 30 (88%) и 28 (85%) пациентов группы 1 соответственно. В группе 2 отмечены одышка у 4 (30%) пациентов, боли в области сердца — у 9 (69%), сердцебиение и/или ощущение ритма сердца — у 6 (46%).

Группы не отличались между собой по функциональным показателям ЛЖ и ЛП, а также по накоплению контраста в раннюю фазу контрастирования (1–2 минуты). У пациентов группы 1 поражение миокарда носило более распространённый характер, который определяли большим количеством сегментов с отсроченным накоплением контраста по неишемическому типу. Кроме того, у 1/3 пациентов группы 1 к моменту проведения МРТ сердца сохранялись лёгочные изменения, а именно

уплотнение лёгочного рисунка и выпот в плевральную полость (рис. 1).

При внутригрупповом сравнении по полу оказалось, что в группе 1 у мужчин статистически значимо ниже ФВ ЛЖ, меньшие показатели глобальной продольной деформации и выше функциональные показатели ЛП. У женщин статистические различия отмечались только по количеству поражённых сегментов миокарда ЛЖ (табл. 2). Группы мужчин и женщин не отличались по возрасту ($p=0,78$ и $p=0,18$ соответственно).

Основные результаты исследования

Основным результатом проведённого нами исследования является обнаружение у лиц, перенёсших COVID-19, большего количества поражённых сегментов миокарда ЛЖ по данным отсроченного накопления в них контраста-парамагнетика, что является проявлением фиброзных

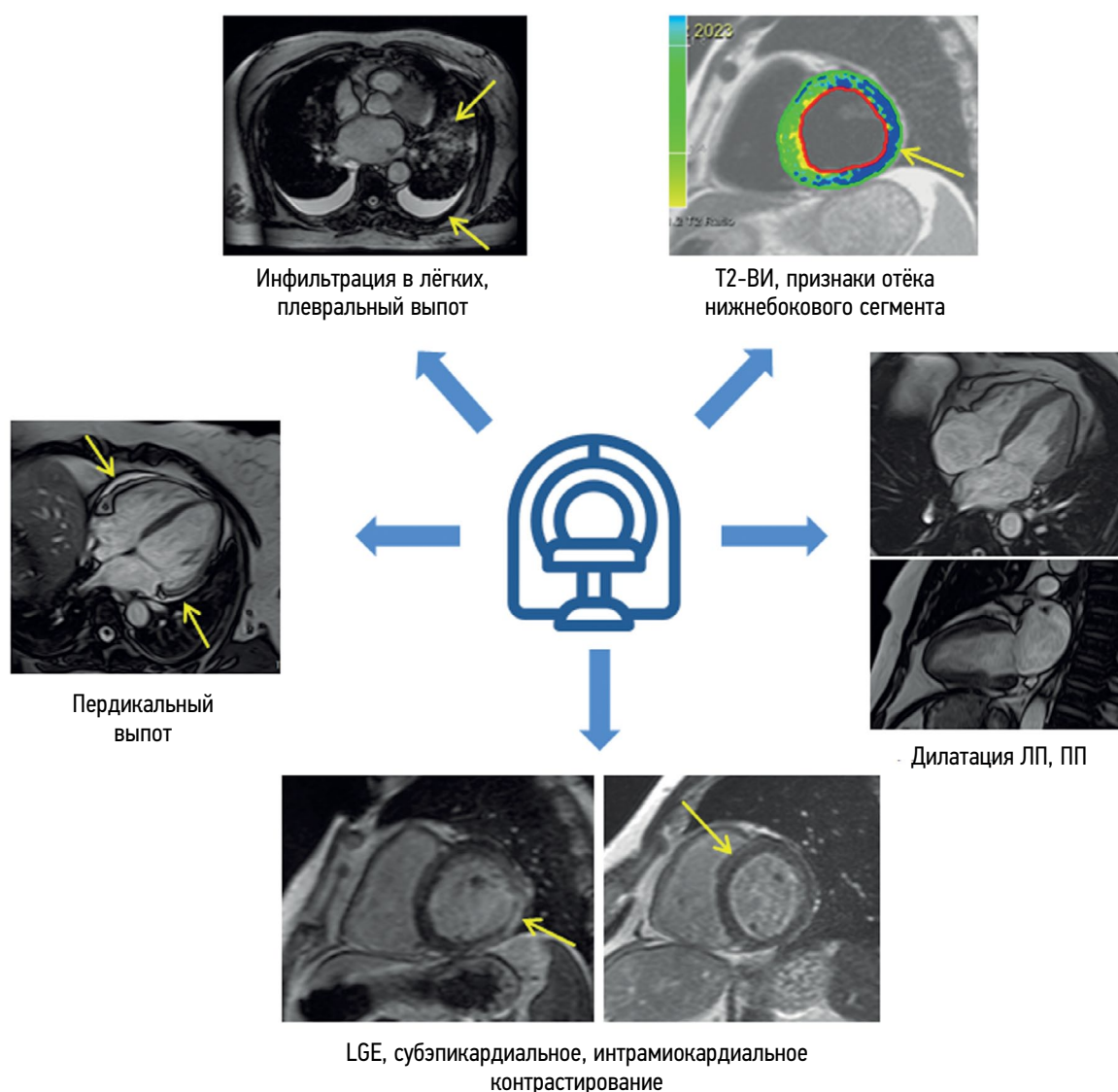


Рис. 1. Характерные симптомы, выявленные при магнитно-резонансной томографии сердца с контрастированием, в группе пациентов, перенёсших COVID-19. T2-ВИ — T2-взвешенное изображение; LGE (late gadolinium enhancement) — режим отсроченного контрастирования; ЛП — левое предсердие; ПП — правое предсердие.

Таблица 2. Сравнительный анализ функции левого желудочка и левого предсердия по данным магнитно-резонансной томографии

Показатель	Мужчины			Женщины		
	COVID-19(+)	COVID-19(-)	<i>p</i>	COVID-19(+)	COVID-19(-)	<i>p</i>
ФВ ЛЖ, %	38 [26,2; 54,5]	63 [62,5; 63,9]	0,04*	65 [59; 70]	64,5 [60,5; 67,7]	0,78
Количество сегментов LGE	7,5 [6,5; 9,5]	4 [3; 4]	0,03*	6,5 [5; 8]	3 [2; 4]	0,00*
Продольная деформация	-7,0 [-9,3; -3,1]	-10,2 [-11,1; -8,2]	0,04*	-14,6 [-15,8; -10,2]	-10,9 [-15; -9,3]	0,62
ЛП, мин. объём, мл	83,8 [37,3; 127,8]	25,6 [18; 35,3]	0,02*	25 [16,1; 35,9]	21,4 [20; 48,9]	0,59
Фракция опорожнения ЛП, %	30,1 [12,1; 47,8]	63,5 [54,9; 68,5]	0,01*	59,9 [53,4; 72,2]	59,9 [55,3; 64,5]	0,94
Индекс растяжимости ЛП, %	43,1 [13,9; 91,9]	173,8 [121,7; 217,9]	0,01*	149,9 [114,7; 259,7]	143,7 [101; 157,9]	0,43

Примечание. * $p < 0,05$. ФВ ЛЖ — фракция выброса левого желудочка, LGE (late gadolinium enhancement) — отсроченное контрастное усиление; ЛП — левое предсердие. Данные представлены в виде медианы (Me) и межквартильного интервала [Q1; Q3].

изменений, в сравнении с результатами МРТ пациентов с подозрением на миокардит допандемийного периода, хотя поражение миокарда было неспецифическим. В мужской части выборки отмечали снижение ФВ ЛЖ, уменьшение глобальной продольной деформации ЛЖ, увеличение объёма ЛП на фоне снижения его сократительной функции. Поскольку основной мишенью вируса SARS-CoV-2 является респираторный тракт, ожидаемо, что в группе пациентов, перенёсших COVID-19, нами выявлено неравномерное уплотнение лёгочной ткани и скопление жидкости в плевральных полостях как проявление длительного разрешения респираторной инфекции. Подобных изменений у пациентов контрольной группы не обнаружено.

ОБСУЖДЕНИЕ

Ранее были представлены данные, что одышка, боли в области сердца являются наиболее распространёнными симптомами COVID-19 [11]. К сожалению, данный симптом сохраняется у пациентов с отрицательным результатом теста на SARS-CoV-2, что приводит к хроническому синдрому COVID-19. Долгосрочные риски и клиническое значение данных симптомов плохо изучены. Мы предположили, что клинические проявления в данной группе пациентов могут быть обусловлены продолжающимся повреждением миокарда за счёт воспаления. Однако у большинства наших пациентов не был выявлен отёк миокарда, а отношение интенсивности сигнала от миокарда к интенсивности сигнала от мышечной ткани на T2-ВИ соответствовало норме. К тому же нами не обнаружено достоверных различий усиления интенсивности миокарда в первые минуты после введения контрастного препарата. Таким образом, в нашей выборке отсутствовали два

из трёх больших МРТ-критериев миокардита — отёк и гиперемия, что, согласно современным рекомендациям [12], не позволяет однозначно говорить о миокардите.

В исследовании Т.Б. Феофановой по оценке сердечно-сосудистой системы 36 пациентов, перенёсших острую вирусную инфекцию COVID-19, отмечено достоверное увеличение ЛП при сохранении ФВ ЛЖ. Так, увеличение ЛП выявлено у 83,3% пациентов и только у 8,4% — снижение систолической функции ЛЖ [13]. Кроме того, большая часть исследуемой авторами группы характеризовалась гипертрофией миокарда ЛЖ (94,4%), развитием лёгочной гипертензии (72,2%), эктопической активностью миокарда предсердий и желудочков, представленной наджелудочковой экстрасистолией (94,4%), желудочковой экстрасистолией (63,9%), пароксизмальной наджелудочковой тахикардией (36,1%). Согласно полученным нами результатам, функция сердца была снижена, но без статистической значимости. ФВ ЛЖ составила в среднем 55%, а медиана КДИ — 61,5 мл/м². LAVi в группе 1 был выше 39,13 мл/м² по сравнению с группой 2 — 27,8 мл/м². В нашей выборке толщина стенки ЛЖ была в пределах нормы, а изменения в лёгких сохранялись у 1/3 пациентов после инфекции COVID-19. Нарушений ритма как распространённого явления постковидных осложнений в нашей выборке не отмечалось.

Имеются сообщения, что первым признаком ремоделирования миокарда ЛЖ является снижение нарушений продольной и/или глобальной деформации ЛЖ [14]. Мы определили снижение показателей продольной деформации ЛЖ у пациентов обеих групп, однако достоверной разницы в значениях между группами не выявлено. Согласно нашим данным, снижение сократительной функции ЛЖ выявлено у 21% пациента, преимущественно у лиц мужского пола.

Интересными оказались полученные нами результаты, свидетельствующие о гендерных различиях между группами. Как уже указывалось выше, у лиц обоего пола группы 1 отмечалось большее поражение миокарда ЛЖ по количеству сегментов с фиброзными изменениями ($p < 0,0000$). При сравнении показателей LAVi, ФО ЛП и индекса растяжимости ЛП между группами мы не обнаружили достоверной разницы, однако при разделении пациентов по полу отмечены достоверно более низкие значения показателей растяжимости и ФО ЛП у пациентов мужского пола, перенёсших коронавирусную инфекцию.

Размер ЛП отражает уровень давления и наполнения ЛЖ, поэтому отражает степень диастолической дисфункции ЛЖ [2, 3]. Ряд исследований продемонстрировал, что увеличение объёма ЛП ассоциировано с риском возникновения фибрилляции предсердий [15–17] и тромбозом в случае, если увеличение объёма ЛП сопровождается дисфункцией у пациентов с фибрилляцией предсердий [18]. У пациентов с сердечной недостаточностью с сохранённой фракцией выброса и синусовым ритмом изменения индексированных объёмов ЛП и ФО ЛП независимо ассоциированы с неблагоприятным сердечно-сосудистым исходом, сравнимым с таковым при персистирующей фибрилляции предсердий, при которой параметры ЛП теряют свою прогностическую значимость [19].

В литературе мало представлены данные о гендерных особенностях ремоделирования ЛП, особенно после перенесённой коронавирусной инфекции. Например, в работе М.В. Чистяковой и соавт. [20], посвящённой исследованию сердца и эндотелиальной дисфункции у больных после COVID-19, показано увеличение LAVi во всех исследуемых группах по сравнению с показателями контрольной группы. Ряд авторов приводит доказательные данные, что именно у женщин показатели ремоделирования ЛП более выражены. Например, у женщин ФО ЛП была значимо меньше — 39% (28; 50) против 50% (42; 55) у мужчин ($p=0,02$) в группе больных с рецидивирующей фибрилляцией предсердий и артериальной гипертонией [10]. Опубликованы данные, что диаметр ЛП был независимым предиктором сердечно-сосудистой смерти у женщин с фибрилляцией предсердий ($p=0,003$) [21, 22]. По данным эхо-КГ через год после выписки, среди лиц, перенёсших подтверждённую пневмонию COVID-19, показано, что индекс объёма опорожнения ЛП значимо ниже в группе с угнетённой глобальной продольной деформацией ЛЖ ($1,3 \pm 0,3$ против $1,4 \pm 0,3$ мл/м²; $p=0,052$) [23]. Вне связи с COVID-19 фибрилляция предсердий чаще встречается у мужчин, но пациенты женского пола демонстрируют более выраженное ремоделирование предсердий при электроанатомическом картировании высокой плотности и большую частоту рецидивов аритмии после абляции фибрилляции предсердий по сравнению с мужчинами. Эти изменения могут способствовать половым

различиям в клиническом течении фибрилляции предсердий у женщин и частично объясняют более высокий риск рецидива [24]. Гендерные особенности изменений в предсердиях пациентов, перенёсших COVID-19, требуют дальнейшего изучения, так как это может иметь клиническое значение как для профилактики фибрилляции предсердий, так и предотвращения рецидивов аритмии после её абляции.

Вероятной причиной ремоделирования ЛП являются выраженная иммунная реакция, сохраняющееся воспаление [25], повреждение эндотелия и тромбогенность микрососудов [26]. Нельзя полностью исключить возможную задержку вируса в кардиомиоцитах с формированием фиброзных изменений.

Столь противоречивые результаты, полученные разными авторами, можно объяснить отсутствием единого подхода к формированию дизайна исследований, что приводит к разнородности изучаемых групп и трудностям в сопоставлении результатов исследований. Однако очевидно, что пациентам, у которых после перенесённой коронавирусной пневмонии выявлено увеличение LAVi, ФО ЛП и индекса растяжимости ЛП на фоне сохранной ФВ ЛЖ, требуется тщательное наблюдение для профилактики развития или своевременного выявления в будущем таких осложнений, как сердечная недостаточность, дисфункция ЛЖ или аритмия.

Ограничения исследования

Во-первых, поскольку каждому пациенту после появления симптомов было проведено одно МРТ-исследование сердца, мы не можем быть уверены, что результаты изменения, о которых сообщалось, также не присутствовали до заражения SARS-CoV-2. В этой связи важно упомянуть, что обнаруженные неишемические LGE могли быть неспецифичными и, возможно, были вызваны ранее не выявленным миокардитом, который присутствовал до заражения SARS-CoV-2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вирус SARS-CoV-2, несомненно, вызывает более распространённое поражение сердца с вовлечением большего количества сегментов миокарда. Увеличивается период сохранения остаточных явлений коронавирусной пневмонии, таких как неравномерное уплотнение лёгочной ткани и скопление жидкости в плевральных полостях. Среди мужчин при этом достоверно чаще развиваются поствоспалительные осложнения в виде нарушения сократительной функции ЛЖ и ЛП.

Полученные результаты указывают на необходимость дальнейшей оценки долгосрочных последствий перенесённого COVID-19 на сердечно-сосудистую систему. МРТ сердца с контрастированием в данном случае может быть чувствительным инструментом визуализации для выявления тяжести поражения сердца.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Источник финансирования. Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 22-15-00313).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Вклад авторов. Авторы подтверждают соответствие своего авторства 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 распределён следующим образом: А.С. Максимова, Н.И. Рюмшина, Т.А. Шелковникова — концепция и дизайн исследования, выполнение и анализ МРТ сердца, оформление клинического заключения, написание текста; О.В. Мочула, В.Ю. Усов — выполнение и анализ МРТ сердца, оформление клинического заключения; Н.Д. Анфиногенова — концепция и дизайн исследования, написание английской версии рукописи, общее руководство.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Усов В.Ю., Нуднов Н.В., Игнатенко Г.А., и др. Первичная и проспективная визуализация грудной клетки при магнитно-резонансной томографии у пациентов с вирусным поражением легких при COVID-19 // Медицинская визуализация. 2020. Т. 24, № 4. С. 11–26. doi: 10.24835/1607-0763-2020-4-11-26
2. Srinivasan A., Wong F., Couch L.S., Wang B.X. Cardiac complications of COVID-19 in low-risk patients // *Viruses*. 2022. Vol. 14, N 6. P. 1322. doi: 10.3390/v14061322
3. Cosyns B., Lochy S., Luchian M.L., et al. The role of cardiovascular imaging for myocardial injury in hospitalized COVID-19 patients // *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*. 2020. Vol. 21, N 7. P. 709–714. doi: 10.1093/ehjci/jeaa136
4. Huang L., Zhao P., Tang D., et al. Cardiac involvement in patients recovered from COVID-2019 identified using magnetic resonance imaging // *JACC Cardiovasc Imaging*. 2020. Vol. 13, N 11. P. 2330–2339. doi: 10.1016/j.jcmg.2020.05.004
5. Luetkens J.A., Isaak A., Öztürk C., et al. Cardiac MRI in suspected acute COVID-19 myocarditis // *Radiol Cardiothorac Imaging*. 2021. Vol. 3, N 2. e200628. doi: 10.1148/ryct.2021200628
6. Puntmann V.O., Carerj M.L., Wieters I., et al. Outcomes of cardiovascular magnetic resonance imaging in patients recently recovered from coronavirus disease 2019 (COVID-19) // *JAMA Cardiol*. 2020. Vol. 5, N 11. P. 1265–1273. doi: 10.1001/jamacardio.2020.3557
7. Ferreira V.M., Plein S., Wong T.C. et al. Cardiovascular magnetic resonance for evaluation of cardiac involvement in COVID-19: Recommendations by the Society for cardiovascular magnetic resonance // *J Cardiovasc Magn Reson*. 2023. Vol. 25, N 1. P. 21. doi: 10.1186/s12968-023-00933-0
8. Yong S.J. Long COVID or post-COVID-19 syndrome: Putative pathophysiology, risk factors, and treatments // *Infect Dis (Lond)*. 2021. Vol. 53, N 10. P. 737–754. doi: 10.1080/23744235.2021.1924397
9. Lewis A.J., Burrage M.K., Ferreira V.M. Cardiovascular magnetic resonance imaging for inflammatory heart diseases // *Cardiovascular Diagnosis and Therapy*. 2020. Vol. 10, N 3. P. 598–609. doi: 10.21037/cdt.2019.12.09

ADDITIONAL INFORMATION

Funding source. This research was supported by the Russian Science Foundation (project #22-15-00313).

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work. A.S. Maksimova, N.I. Ryumshina, T.A. Shelkovnikova — concept and design of the study, performance and analysis of cardiac MRI, drafting of the clinical conclusion, drafting of the text; O.V. Mochula, V.Y. Usov — performance and analysis of cardiac MRI, drafting of the clinical conclusion; N.D. Anfinogenova — concept and design of the study, drafting of the English version of the manuscript, general guidance.

10. Кохан Е.В., Озова Е.М., Романова В.А., и др. Фазовый анализ функции левого предсердия у пациентов с артериальной гипертензией и фибрилляцией предсердий: гендерные особенности связи с диастолической дисфункцией и параметрами центрального давления // Рациональная фармакотерапия в кардиологии. 2019. Т. 15, № 5. С. 622–633. doi: 10.20996/1819-6446-2019-15-5-622-633
11. Kravchenko D., Isaak A., Zimmer S., et al. Cardiac MRI in patients with prolonged cardiorespiratory symptoms after mild to moderate COVID-19 // *Radiology*. 2021. Vol. 301, N 3. P. E419–E425. doi: 10.1148/radiol.2021211162
12. Арутюнов Г.П., Палеев Ф.Н., Моисеева О.М., и др. Миокардиты у взрослых. Клинические рекомендации-2020 // Российский кардиологический журнал. 2021. Т. 266, № 11. С. 4790. doi: 10.15829/1560-4071-2021-4790
13. Феофанова Т.Б., Залетова Т.С., Абакаров Р.М., Зайнудинов З.М. Оценка состояния сердечно-сосудистой системы у пациентов, перенесших COVID-19 // *Int J Med Psychol*. 2021. Т. 4, № 7. С. 84–87.
14. Широков Н.Е., Ярославская Е.И., Криночкин Д.В., и др. Связь вариантов скрытой контрактильной дисфункции левого желудочка и признаков иммунного воспаления у пациентов, перенесших COVID-19-пневмонию // Кардиоваскулярная терапия и профилактика. 2023. Т. 22, № 3. С. 3434. doi: 10.15829/1728-8800-2023-3434
15. Pozios I., Vouliotis A.I., Dilaveris P., Tsioufis C. Electro-mechanical alterations in atrial fibrillation: Structural, electrical, and functional correlates // *J Cardiovasc Dev Dis*. 2023. Vol. 10, N 4. P. 149. doi: 10.3390/jcdd10040149
16. Raisi-Estabragh Z., McCracken C., Condurache D., et al. Left atrial structure and function are associated with cardiovascular outcomes independent of left ventricular measures: A UK Biobank CMR study // *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*. 2022. Vol. 23, N 9. P. 1191–1200. doi: 10.1093/ehjci/jeab266
17. Floria M., Radu S., Gosav E.M., et al. Left atrial structural remodelling in non-valvular atrial fibrillation: What have we learnt

from CMR? // *Diagnostics (Basel)*. 2020. Vol. 10, N 3. P. 137. doi: 10.3390/diagnostics10030137

18. Kim H.D., Cho D.H., Kim M.N., et al. Left atrial dysfunction, fibrosis and the risk of thromboembolism in patients with paroxysmal and persistent atrial fibrillation // *Int J Heart Fail*. 2022. Vol. 4, N 1. P. 42–53. doi: 10.36628/ijhf.2021.0043

19. Schönbauer R., Kammerlander A.A., Duca F., et al. Prognostic impact of left atrial function in heart failure with preserved ejection fraction in sinus rhythm vs persistent atrial fibrillation // *ESC Heart Fail*. 2022. Vol. 9, N 1. P. 465–475. doi: 10.1002/ehf2.13723

20. Чистякова М.В., Говорин А.В., Мудров В.А., и др. Поражение сердца и эндотелиальная дисфункция у больных, перенесших коронавирусную инфекцию // *Вестник терапевта*. 2023. № 1. С. 1–7.

21. Rienstra M., Van Veldhuisen D.J., Hagens V.E., et al. Gender-Related differences in rhythm control treatment in persistent atrial fibrillation // *J Am Coll Cardiol*. 2005. Vol. 46, N 7. P. 1298–306. doi: 10.1016/j.jacc.2005.05.078

22. Proietti M., Raparelli V., Basili S., et al. Relation of female sex to left atrial diameter and cardiovascular death in atrial fibrillation:

The AFFIRM Trial // *Int J Cardiol*. 2016. N 207. P. 258–263. doi: 10.1016/j.ijcard.2016.01.169

23. Ярославская Е.И., Криночкин Д.В., Широков Н.Е., и др. Клинико-эхокардиографический профиль пациентов, перенесших пневмонию COVID-19, через год после выписки в зависимости от глобальной продольной деформации левого желудочка // *Сибирский журнал клинической и экспериментальной медицины*. 2022. Т. 37, № 4. С. 52–62. doi: 10.29001/2073-8552-2022-37-4-52-62

24. Wong G.R., Nalliah C.J., Lee G., et al. Sex-Related differences in atrial remodeling in patients with atrial fibrillation: Relationship to ablation outcomes // *Circ Arrhythm Electrophysiol*. 2022. Vol. 15, N 1. P. e009925. doi: 10.1161/CIRCEP.121.009925

25. Bräuninger H., Stoffers B., Fitzek A.D., et al. Cardiac SARS-CoV-2 infection is associated with pro-inflammatory transcriptomic alterations within the heart // *Cardiovasc Res*. 2022. Vol. 118, N 2. P. 542–555. doi: 10.1093/cvr/cvab322

26. Wu L., Jiang Z., Meulendijks E.R., et al. Atrial inflammation and microvascular thrombogenicity are increased in deceased COVID-19 patients // *Cardiovasc Pathol*. 2023. N 64. P. 107524. doi: 10.1016/j.carpath.2023.107524

REFERENCES

1. Ussov WY, Nudnov NV, Ignatenko GA, et al. Primary and prospective imaging of the chest using magnetic resonance imaging in patients with viral lung damage in COVID-19. *Medical Imaging*. 2020;24(4):11–26. (In Russ). doi: 10.24835/1607-0763-2020-4-11-26

2. Srinivasan A, Wong F, Couch LS, Wang BX. Cardiac complications of COVID-19 in low-risk patients. *Viruses*. 2022;14(6):1322. doi: 10.3390/v14061322

3. Cosyns B, Lochy S, Luchian ML, et al. The role of cardiovascular imaging for myocardial injury in hospitalized COVID-19 patients. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*. 2020;21(7):709–714. doi: 10.1093/ehjci/jeaa136

4. Huang L, Zhao P, Tang D, et al. Cardiac involvement in patients recovered from COVID-2019 identified using magnetic resonance imaging. *JACC Cardiovasc Imaging*. 2020;13(11):2330–2339. doi: 10.1016/j.jcmg.2020.05.004

5. Luetkens JA, Isaak A, Öztürk C, et al. Cardiac MRI in suspected acute COVID-19 myocarditis. *Radiol Cardiothorac Imaging*. 2021;3(2):e200628. doi: 10.1148/ryct.2021200628

6. Puntmann VO, Carerj ML, Wieters I, et al. Outcomes of cardiovascular magnetic resonance imaging in patients recently recovered from coronavirus disease 2019 (COVID-19). *JAMA Cardiol*. 2020;5(11):1265–1273. doi: 10.1001/jamacardio.2020.3557

7. Ferreira VM, Plein S, Wong TC, et al. Cardiovascular magnetic resonance for evaluation of cardiac involvement in COVID-19: Recommendations by the society for cardiovascular magnetic resonance. *J Cardiovasc Magn Reson*. 2023;25(1):21. doi: 10.1186/s12968-023-00933-0

8. Yong SJ. Long COVID or post-COVID-19 syndrome: Putative pathophysiology, risk factors, and treatments. *Infect Dis (Lond)*. 2021;53(10):737–754. doi: 10.1080/23744235.2021.1924397

9. Lewis AJ, Burrage MK, Ferreira VM. Cardiovascular magnetic resonance imaging for inflammatory heart diseases. *Cardiovascular Diagnosis Therapy*. 2020;10(3):598–609. doi: 10.21037/cdt.2019.12.09

10. Kokhan EV, Ozova M., Romanova VA, et al. Left atrial phasic function in patients with hypertension and recurrent atrial fibrillation: Gender differences of the relationship with diastolic dysfunction and central aortic pressure. *Rational Pharmacotherapy Cardiology*. 2019;15(5):622–633. (In Russ). doi: 10.20996/1819-6446-2019-15-5-622-633

11. Kravchenko D, Isaak A, Zimmer S, et al. Cardiac MRI in patients with prolonged cardiorespiratory symptoms after mild to moderate COVID-19. *Radiology*. 2021;301(3):E419–E425. doi: 10.1148/radiol.2021211162

12. Arutyunov GP, Paleev FN, Moiseeva OM, et al. 2020 Clinical practice guidelines for myocarditis in adults. *Russ J Cardiol*. 2021;26(11):4790. (In Russ). doi: 10.15829/1560-4071-2021-4790

13. Feofanova TB, Zaletova TS, Abakarov RM, Zainudinov ZM. Assessment of the state of the cardiovascular system in patients with COVID-19. *Int J Med Psychol*. 2021;4(7):84–87. (In Russ).

14. Shirokov NE, Yaroslavskaya EI, Krinochkin DV, et al. Relationship between latent left ventricular contractile dysfunction and signs of immune inflammation in patients with COVID-19 pneumonia. *Cardiovascular Therapy Prevention*. 2023;22(3):3434. (In Russ). doi: 10.15829/1728-8800-2023-3434

15. Pozios I, Vouliotis AI, Dilaveris P, Tsioufis C. Electro-mechanical alterations in atrial fibrillation: Structural, electrical, and functional correlates. *J Cardiovasc Dev Dis*. 2023;10(4):149. doi: 10.3390/jcdd10040149

16. Raisi-Estabragh Z, McCracken C, Condurache D, et al. Left atrial structure and function are associated with cardiovascular outcomes independent of left ventricular measures: A UK Biobank CMR study. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*. 2022;23(9):1191–1200. doi: 10.1093/ehjci/jeab266

17. Floria M, Radu S, Gosav EM, et al. Left atrial structural remodelling in non-valvular atrial fibrillation: What have we learnt from CMR? *Diagnostics (Basel)*. 2020;10(3):137. doi: 10.3390/diagnostics10030137

18. Kim HD, Cho DH, Kim MN, et al. Left atrial dysfunction, fibrosis and the risk of thromboembolism in patients with paroxysmal and persistent atrial fibrillation. *Int J Heart Fail.* 2022;4(1):42–53. doi: 10.36628/ijhf.2021.0043
19. Schönbauer R, Kammerlander AA, Duca F, et al. Prognostic impact of left atrial function in heart failure with preserved ejection fraction in sinus rhythm vs persistent atrial fibrillation. *ESC Heart Fail.* 2022;9(1):465–475. doi: 10.1002/ehf2.13723
20. Chistyakova MV, Govorin AV, Mudrov VA, et al. Heart damage and endothelial dysfunction in patients with coronavirus infection. *Therapists Bulletin.* 2023;(1):1–7. (In Russ).
21. Rienstra M, van Veldhuisen DJ, Hagens VE, et al. Gender-related differences in rhythm control treatment in persistent atrial fibrillation. *J Am Coll Cardiol.* 2005;46(7):1298–306. doi: 10.1016/j.jacc.2005.05.078
22. Proietti M, Raparelli V, Basili S, et al. Relation of female sex to left atrial diameter and cardiovascular death in atrial fibrillation: The AFFIRM Trial. *Int J Cardiol.* 2016;(207):258–263. doi: 10.1016/j.ijcard.2016.01.169

23. Yaroslavskaya EI, Krinochkin DV, Shirokov NE, et al. Clinical and echocardiographic profile of patients one year after COVID-19 pneumonia depending on the left ventricular global longitudinal strain. *Siberian J Clin Experimental Med.* 2022;37(4):52–62. (In Russ). doi: 10.29001/2073-8552-2022-37-4-52-62
24. Wong GR, Nalliah CJ, Lee G, et al. Sex-Related differences in atrial remodeling in patients with atrial fibrillation: Relationship to ablation outcomes. *Circ Arrhythm Electrophysiol.* 2022;15(1):e009925. doi: 10.1161/CIRCEP.121.009925
25. Bräuninger H, Stoffers B, Fitzek AD, et al. Cardiac SARS-CoV-2 infection is associated with pro-inflammatory transcriptomic alterations within the heart. *Cardiovasc Res.* 2022;118(2):542–555. doi: 10.1093/cvr/cvab322
26. Wu L, Jiang Z, Meulendijks ER, et al. Atrial inflammation and microvascular thrombogenicity are increased in deceased COVID-19 patients. *Cardiovasc Pathol.* 2023;(64):107524. doi: 10.1016/j.carpath.2023.107524

ОБ АВТОРАХ

*** Рюмшина Надежда Игоревна**, канд. мед. наук;
адрес: Россия, 634012, Томск, ул. Киевская, д. 111а;
ORCID: 0000-0002-6158-026X;
eLibrary SPIN: 6555-8937;
e-mail: n.rumshina@list.ru

Максимова Александра Сергеевна, канд. мед. наук;
ORCID: 0000-0002-4871-3283;
eLibrary SPIN: 2879-9550;
e-mail: asmaximova@yandex.ru

Шелковникова Татьяна Александровна, канд. мед. наук;
ORCID: 0000-0001-8089-2851;
eLibrary SPIN: 1826-7850;
e-mail: ffily@mail.ru

Мочула Ольга Витальевна, канд. мед. наук;
ORCID: 0000-0002-7502-7502;
eLibrary SPIN: 3712-8492;
e-mail: mochula.olga@gmail.com

Анфиногенова Нина Джоновна, д-р мед. наук;
ORCID: 0000-0003-1106-0730;
eLibrary SPIN: 6784-5440;
e-mail: cardio.intl@gmail.com

Усов Владимир Юрьевич, д-р мед. наук, профессор;
ORCID: 0000-0002-7352-6068;
eLibrary SPIN: 1299-2074;
e-mail: ussov1962@yandex.ru

AUTHORS' INFO

*** Nadezhda I. Ryumshina**, MD, Cand. Sci. (Med.);
address: 111a Kievskaya street, 634012 Tomsk, Russia;
ORCID: 0000-0002-6158-026X;
eLibrary SPIN: 6555-8937;
e-mail: n.rumshina@list.ru

Aleksandra S. Maksimova, MD, Cand. Sci. (Med.);
ORCID: 0000-0002-4871-3283;
eLibrary SPIN: 2879-9550;
e-mail: asmaximova@yandex.ru

Tatiana A. Shelkovnikova, MD, Cand. Sci. (Med.);
ORCID: 0000-0001-8089-2851;
eLibrary SPIN: 1826-7850;
e-mail: ffily@mail.ru

Olga V. Mochula, MD, Cand. Sci. (Med.);
ORCID: 0000-0002-7502-7502;
eLibrary SPIN: 3712-8492;
e-mail: mochula.olga@gmail.com

Nina D. Anfinogenova, MD, Dr. Sci. (Med.);
ORCID: 0000-0003-1106-0730;
eLibrary SPIN: 6784-5440;
e-mail: cardio.intl@gmail.com

Wladimir Yu. Ussov, MD, Dr. Sci. (Med.), Professor;
ORCID: 0000-0002-7352-6068;
eLibrary SPIN: 1299-2074;
e-mail: ussov1962@yandex.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD501771>

Рентгеноконтрастные шаблоны для определения минеральной плотности кости по данным конусно-лучевой и мультиспиральной компьютерной томографии

Ш.Д. Хоссаин¹, А.В. Петрайкин², А.А. Мураев¹, А.Б. Данаев³, Д.В. Буренчев²,
А.А. Долгалев³, Ю.А. Васильев², Д.Е. Шарова², С.Ю. Иванов^{1, 4}

¹ Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Российская Федерация;

² Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий, Москва, Российская Федерация;

³ Ставропольский государственный медицинский университет, Ставрополь, Российская Федерация;

⁴ Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова (Сеченовский Университет), Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Конусно-лучевая компьютерная томография позволяет проводить диагностику на этапе планирования различных манипуляций в челюстно-лицевой области, в частности при дентальной имплантации. Преимущества данного метода: высокое пространственное разрешение, низкая лучевая нагрузка, доступность исследований, однако имеется существенный недостаток — отсутствие возможности определения плотности кости челюстей в единицах Хаунсфилда (HU).

Цели — разработать набор рентгеноконтрастных шаблонов с заданной рентгеновской плотностью на основе гидрофосфата калия и β-трикальцийфосфата; изучить результаты сканирования шаблона на конусно-лучевом и мультисрезовом компьютерных томографах; определить алгоритм кросс-калибровки для оценки минеральной плотности кости челюстей в HU и по классификации C. Misch.

Материалы и методы. В качестве рентгеноконтрастного шаблона использованы раствор гидрофосфата калия, суспензия β-трикальцийфосфата. В микропробирках шаблона объемом 0,25 мл заданы следующие концентрации гидрофосфата калия: 49,96; 99,98; 174,99; 349,99; 549,98 мг/мл; суспензия β-трикальцийфосфата с эквивалентной концентрацией гидрофосфата калия 1506 мг/мл. Шаблоны моделируют типы плотности костной ткани по C. Misch. Исследование шаблонов проводилось на 2 мультисрезовых и 4 конусно-лучевых компьютерных томографах.

Результаты. В ходе работы проанализированы зависимости Gray Value (GV) для конусно-лучевых и HU для мультисрезовых компьютерных томографов от заданных значений минеральной плотности кости. Отмечается существенный разброс измеренных величин. Различаются углы наклона зависимостей и формы кривых. После кросс-калибровки показана хорошая сопоставимость пересчитанных значений относительно режима исследуемого мультисрезового компьютерного томографа.

Заключение. Разработанный рентгеноконтрастный шаблон позволяет стандартизировать денситометрические показатели для конусно-лучевых и различных мультисрезовых компьютерных томографов: в среднем разброс после кросс-калибровки снижается в 10 раз, что обеспечивает возможность классификации костной ткани в HU по C. Misch.

Ключевые слова: конусно-лучевая компьютерная томография; мультиспиральная компьютерная томография; кросс-калибровка; минеральная плотность кости; рентгеновская плотность; денситометрия; имплантация зубов.

Как цитировать:

Хоссаин Ш.Д., Петрайкин А.В., Мураев А.А., Данаев А.Б., Буренчев Д.В., Долгалев А.А., Васильев Ю.А., Шарова Д.Е., Иванов С.Ю. Рентгеноконтрастные шаблоны для определения минеральной плотности кости по данным конусно-лучевой и мультиспиральной компьютерной томографии // *Digital Diagnostics*. 2023. Т. 4, № 3. С. 292–305. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD501771>

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD501771>

Bone mineral density radiopaque templates for cone beam computed tomography and multidetector computed tomography

Shazmim D. Hossain¹, Alexey V. Petraikin², Alexandr A. Muraev¹, Aslan B. Danaev³, Dmitry V. Burenchev², Alexander A. Dolgalev³, Yuriy A. Vasilev², Dariya E. Sharova², Sergey Yu. Ivanov^{1,4}

¹ Peoples Friendship University of Russia, Moscow, Russian Federation;

² Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies, Moscow, Russian Federation;

³ Stavropol State Medical University, Moscow, Russian Federation;

⁴ The First Sechenov Moscow State Medical University (Sechenov University), Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: Cone beam computed tomography is widely applied for diagnostics and planning various manipulations in the maxillofacial region, for example, dental implantation. Its advantages include high spatial resolution, low radiation exposure, and cost-effectiveness. However, it has a significant drawback: the inability to determine the density of the jaw bone in Hounsfield Units (HU).

AIMS: This study aimed to develop radiopaque templates with sets of X-ray density based on potassium hydrophosphate and beta-tricalcium phosphate, to study templates on various cone beam computed tomography and multidetector computed tomography devices, and to determine a cross-calibration algorithm for assessing the bone mineral density of the jaw in HU.

MATERIALS AND METHODS: The bone mineral density template comprised microtubes (0.25 ml) with potassium hydrophosphate concentrations of 49.96, 99.98, 174.99, 349.99, and 549.98 mg/ml, and a suspension of beta-tricalcium phosphate with an equivalent concentration of potassium hydrophosphate 1,506 mg/ml, designed to simulate the types of bone density according to C. Mish. The study was carried out on two multidetector computed tomography and four cone beam computed tomography machines. Cross-calibration was referred on the "standard" multidetector computed tomography 1 mode 120 kV, 200 mA.

RESULTS: There was a significant scatter of the X-ray values (HU for multidetector computed tomography and GV for cone beam computed tomography) vs. bone mineral density, with varying slopes, bias, and curve shapes. After cross-calibration, good comparability corresponding to the multidetector computed tomography 1 mode was shown. The median of the differences before cross-calibration was 160 relative units (HU, GV), after decreased by 10 times and amounted to 16 rel. units ($p=0.000$). The mean difference for cone beam computed tomography was significantly higher (30 rel. units) than for multidetector computed tomography (8 rel. units) ($p=0.024$, Mann-Whitney U test).

CONCLUSION: The developed radiopaque template enables the standardization of densitometric indicators for cone beam computed tomography and various multidetector computed tomography modes. On average, the spread after cross-calibration is reduced by 10 times, which makes it possible to classify bone tissue in HU according to C. Mish.

Keywords: cone beam computed tomography; multidetector computed tomography; cross-calibration; bone mineral density; X-ray density; densitometry; dental implantation.

To cite this article:

Hossain ShD, Petraikin AV, Muraev AA, Danaev AB, Burenchev DV, Dolgalev AA, Vasilev YuA, Sharova DE, Ivanov SYu. Bone mineral density radiopaque templates for cone beam computed tomography and multidetector computed tomography. *Digital Diagnostics*. 2023;4(3):292–305. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD501771>

Received: 21.06.2023

Accepted: 22.08.2023

Published: 30.08.2023

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD501771>

利用锥形束和多层螺旋计算机断层扫描数据测定骨矿物质密度的X射线对比模板

Shazmim D. Hossain¹, Alexey V. Petraikin², Alexandr A. Muraev¹, Aslan B. Danaev³, Dmitry V. Burenchev², Alexander A. Dolgalev³, Yuriy A. Vasilev², Dariya E. Sharova², Sergey Yu. Ivanov^{1,4}

¹ Peoples Friendship University of Russia, Moscow, Russian Federation;

² Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies, Moscow, Russian Federation;

³ Stavropol State Medical University, Moscow, Russian Federation;

⁴ The First Sechenov Moscow State Medical University (Sechenov University), Moscow, Russian Federation

简评

论证。锥形束计算机断层扫描 (cone beam computed tomography, CBCT) 允许在颌面部各种操作的规划阶段进行诊断，特别是在牙种植入方面。这种方法的优点是空间分辨率高、辐射量低、便于研究。然而，它也有一个明显的缺点：无法确定以亨氏 (Hounsfield Unit, HU) 单位的颌骨密度。CBCT中的X射线密度是以Gray Value (GV) 单位确定的。

该研究的目的是根据磷酸氢二钾 (DHP) 和 β -磷酸三钙 (β -TCP) 开发一套具有特定X射线密度的X射线对比模板，研究在CBCT和多层螺旋计算机断层扫描 (MSCT) 上扫描模板的结果，确定用于估算HU下颌骨矿物质密度的交叉校验算法，并根据C. Mish进行分类。

材料和方法。使用DHP溶液、 β -TCP悬浮液作为X射线对比模板。模板的0.25ml微量试管中DHP的浓度分别为：49.96、99.98、174.99、349.99、549.98mg/ml， β -TCP悬浮液中DHP的等效浓度为1506mg/ml。这些模板根据C. Mish分类模拟了骨密度类型。这些模板检验是在2个MSCT和4个CBCT上进行的。在“标准”MSCT1模式120kV、200mA上进行了交叉校验；对所获得的依赖关系进行了线性和二次近似。

结果。在工作过程中，我们分析了CBCT的GV和MSCT的HU与IPC给定值的关系。我们发现了测量值存在显著差异。相关斜率角度和曲线形状各不相同。交叉校验后，与MSCT1模式相比，重新计算的数值具有良好的可比性。交叉校验前测量值的中位数差异为160个相对单位 (HU、GV)，重新计算后显著减少了10倍，为16个相对单位 ($p=0,000$)，可靠显示了CBCT的平均差异 (30个相对单位) 大于MSCT的平均差异 (8个相对单位)， $p=0,024$ ；采用曼-惠特尼U检验进行了比较。

结论。我们开发的X射线对比模板允许使CBCT和不同MSCT模式的密度测定指数标准化，交叉校验后的分散平均减少了10倍，这提供根据C. Mish对HU中的骨组织进行分类的可能性。

关键词：锥形束计算机断层扫描；多层螺旋计算机断层扫描；交叉校验；骨矿物质密度；X射线密度；密度测定；牙种植入。

引用本文：

Hossain ShD, Petraikin AV, Muraev AA, Danaev AB, Burenchev DV, Dolgalev AA, Vasilev YuA, Sharova DE, Ivanov SYu. 利用锥形束和多层螺旋计算机断层扫描数据测定骨矿物质密度的X射线对比模板. *Digital Diagnostics*. 2023;4(3):292–305. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD501771>

收到: 21.06.2023

接受: 22.08.2023

发布日期: 30.08.2023

Список сокращений

КЛКТ — конусно-лучевой компьютерный томограф
КТ — компьютерная томография

МПК — минеральная плотность кости
МСКТ — мультиспиральный компьютерный томограф

ОБОСНОВАНИЕ

Появление метода компьютерной томографии (КТ) в 1972 году позволило проводить диагностику различных областей организма человека при помощи трёхмерных изображений [1]. Данный инструмент используется во многих областях медицины, а применение в стоматологии стало наиболее частым с появлением такого направления, как дентальная имплантация [2]. На сегодняшний день одним из основных ориентиров для определения рентгенологических денситометрических показателей костной ткани является относительная шкала рентгенологической плотности Хаунсфилда (HU) [3]. На эту шкалу ориентируется классификация плотности костной ткани Carl E. Misch, применяемая в стоматологии [4].

В силу высокой дозы ионизирующего излучения и больших финансовых затрат при использовании мультиспиральной компьютерной томографии (МСКТ) было реализовано создание более безопасной и менее финансово затратной конусно-лучевой компьютерной томографии (КЛКТ). Однако у данной технологии существуют недостатки, основными из которых являются наличие специфических артефактов и большая погрешность определения рентгеновской плотности [5–7]. В КЛКТ рентгеновская плотность оценивается в относительных величинах Mean Gray Value (GV), в отличие от стабильных единиц рентгеновской плотности в МСКТ, выраженных в единицах Хаунсфилда (Hounsfield, HU). Это не позволяет в полной мере выявить индивидуальные анатомические и плотностные характеристики костных структур пациента для планирования дентальной имплантации. Данные недостатки зависят от различного поглощения тканями рентгеновского излучения, параметров сканирования, а также алгоритма реконструкции КЛКТ-аппарата [8]. Учитывая это, актуален вопрос о разработке универсального метода калибровки, который бы позволил снизить погрешности при проведении КЛКТ, повысить точность оценки плотности кости и, в свою очередь, снизить вероятность интра- и послеоперационных осложнений.

Решить данный вопрос позволит разработка рентгеноконтрастных шаблонов. Для этих целей возможно применение гидрофосфата калия, близкого по свойствам поглощения рентгеновского излучения к гидроксиапатиту кальция — основному минеральному комплексу нативной кости. Ранее было обосновано применение фантомов, моделирующих минеральную плотность кости (МПК), с использованием гидрофосфата калия [9]. Этот

подход позволяет моделировать МПК образцов костной ткани в широком диапазоне, максимально приближенно имитируя сканирование пациента: применяя идентичные режимы исследования и моделируя поглощение рентгеновского излучения тканями пациента. Данный подход используется в количественной КТ [9].

Наше экспериментальное исследование направлено на изучение эффективности разработанных рентгеноконтрастных шаблонов МПК и алгоритмов кросс-калибровки для повышения точности оценки денситометрических показателей шести компьютерных томографов (четырёх КЛКТ и двух МСКТ; далее порядковый номер каждого исследуемого томографа указан рядом с аббревиатурой: КЛКТ 1, КЛКТ 2; КЛКТ 3, КЛКТ 4; МСКТ 1 и МСКТ 2).

Цели исследования — разработать набор рентгеноконтрастных шаблонов с заданной рентгеновской плотностью на основе гидрофосфата калия и β-трикальцийфосфата; изучить результат сканирования шаблона на различных КЛКТ и МСКТ аппаратах, определить алгоритм кросс-калибровки для оценки минеральной плотности кости челюстей по классификации C. Misch.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Общая характеристика разработанного шаблона минеральной плотности

В качестве материала для изготовления модельных образцов МПК использован гидрофосфат калия в определённой массовой концентрации. Высокая растворимость данного вещества позволила точно задать диапазон концентраций, моделирующих губчатое вещество и кортикальный слой низкой плотности (от 50 до 550 мг/мл). Кортикальный слой высокой плотности моделировался суспензией нерастворимого в воде β-трикальцийфосфата — эквивалента гидроксиапатита костной ткани. Концентрации были подобраны так, чтобы получить соответствие всем классам плотности кости (от D1 до D5) по шкале Carl E. Misch [4]; табл. 1.

Калибровочный шаблон состоял из двух наборов пластиковых пробирок объёмом 0,25 мл, закреплённых вокруг пробирок объёмом 50 мл (рис. 1). Калибровочные пробирки содержали (1) дистиллированную воду; (2–6) растворы гидрофосфата калия в концентрациях от 50 до 550 мг/мл; (7) β-трикальцийфосфата в концентрации 846 мг/мл, что в пересчёте на эквивалентное содержание гидрофосфата калия составляет 1500 мг/мл (см. табл. 1).

Таблица 1. Характеристики изготовленного шаблона минеральной плотности кости в сопоставлении со шкалой Carl E. Misch [4]

Номер пробирки в шаблоне (объём 0,25 мл)	Значения, полученные в ходе исследования			Шкала Misch	
	Заданная концентрация МПК, мг/мл	Полученная концентрация МПК	Измеренные значения HU МСКТ 1 (строка 5, табл. 2)	Тип костной ткани	HU
1	0	0	1,5	-	-
2	50	49,96	78	D5	<150
3	100	99,98	161	D4	150–350
4	175	174,99	281	D4	150–350
5	350	349,99	540	D3	350–850
6	550	549,98	816*	D2	850–1250
7	1500	1506	2165	D1	>1250

Примечание. * Образец ниже соответствующего диапазона плотности по Misch. МПК — минеральная плотность кости; МСКТ 1 — исследуемый мультиспиральный компьютерный томограф 1.

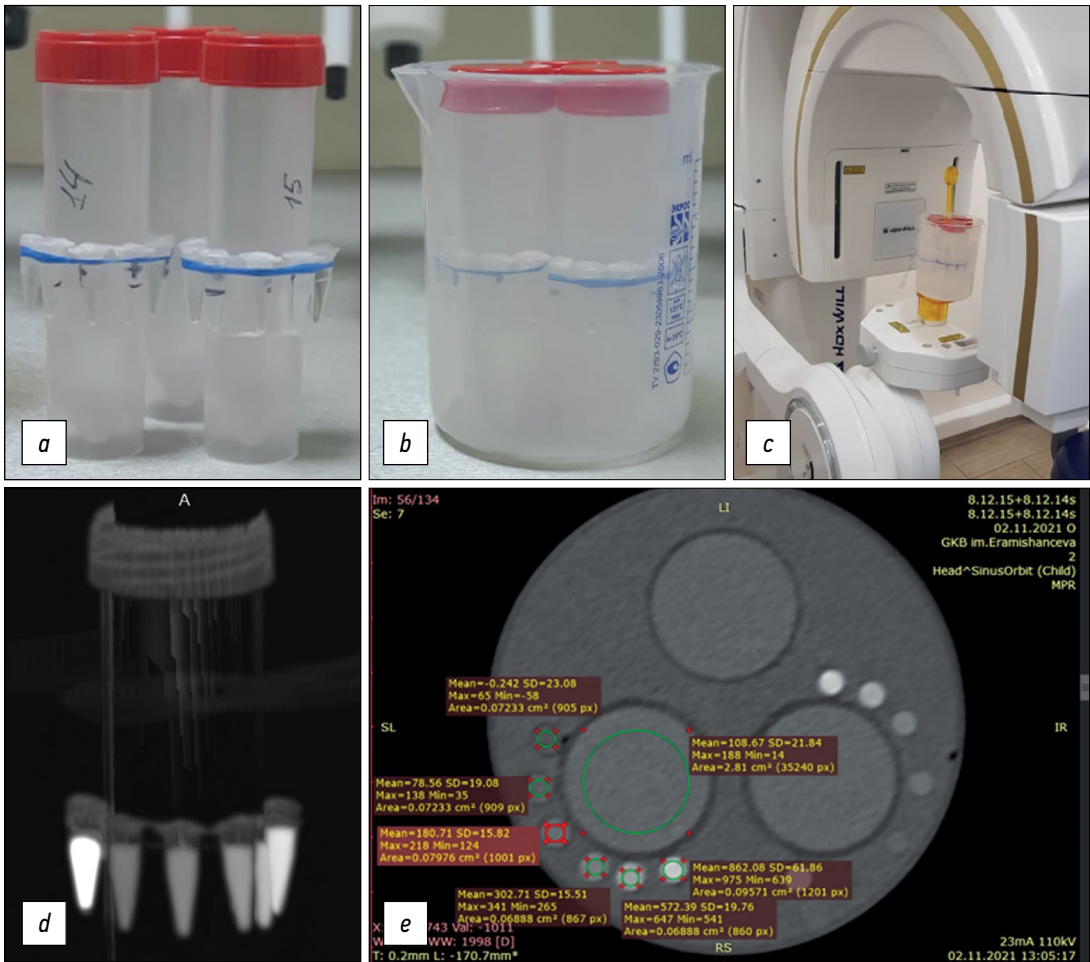


Рис. 1. Общая демонстрация этапов исследования: а — исходные пробирки с рентгеноконтрастным веществом (рентгеноконтрастные шаблоны минеральной плотности) на воздухе; б — исходные пробирки с рентгеноконтрастным веществом в воде; с — пример фиксации и проведения исследования шаблонов на конусно-лучевом компьютерном томографе; д — MIP-реконструкция при исследовании методом мультиспиральной компьютерной томографии; е — пример просмотра и обработки в формате DICOM срезов исходных пробирок (программа Radiant) и характеристики на исследуемом мультиспиральном компьютерном томографе 3 (см. табл. 2 строку 7).

Три пробирки объёмом 50 мл, на которых закреплялись шаблоны, были заполнены гидрофосфатом калия в концентрациях 65,97 и 58,64 мг/мл и водой. Данные пробирки не использовались для калибровки (см. рис. 1).

Для приготовления раствора гидрофосфата калия был использован кристаллогидрат данного вещества с содержанием основного вещества $K_2HPO_4 \cdot 3H_2O$ более 99% по ГОСТ 2493-75 (Pan Reac Applichem ITV Reagents); также

Таблица 2. Проанализированные в работе томографы и режимы сканирования

№ п/п	Название томографа (компания, страна-производитель); используемое сокращение	Напряжение на трубке, кВ	Сила тока на трубке, мА
1	Orthopantomograph OP 3D (KAVO, США); КЛКТ 1	95	4
2	HDX WILL (HDX WILL CORP., Корея); КЛКТ 2	85	8
3	Orthopantomograph OP300 (KAVO, США); КЛКТ 3	90	3,2
4	Vatech PaX-Uni3D (Vatech Global, Южная Корея); КЛКТ 4	90	5
5	GE Discovery NM/CT 670 (GE Healthcare, США); МСКТ 1*	120	200
6	GE Discovery LOW/CT 670 (GE Healthcare, США); МСКТ 2	80	10
7	Siemens Somatom Perspective (Siemens, США); МСКТ 3	110	23

Примечание. * МСКТ 1 (строка 5) принят за стандарт, для которого проводится кросс-калибровка в ходе дальнейшей работы. МСКТ 1 — исследуемый мультиспиральный компьютерный томограф 1.

был использован β -трикальцийфосфат с содержанием основного вещества $\text{Ca}_3 \times (\text{PO}_4)_2$ более 98% (Sigma-Aldrich). Для взвешивания использовались аналитические весы OHAUS Pioneer (PA), класс точности по ГОСТ OIML R 76-1-2011 I (специальный). Растворение навесок гидрофосфата калия проводилось в дегазированной дистиллированной воде в мерной колбе (49,89 мл; относительная погрешность задания объёма 0,06%).

Характеристика исследования

Сканирование разработанных шаблонов проводили в стандартных клинических режимах визуализации челюстно-лицевой области. Томографы и режимы исследования объединены в табл. 2. Проанализированы результаты для 4 КЛКТ трёх компаний-производителей (см. табл. 2, строки 1–4), а также 2 МСКТ двух компаний-производителей (см. табл. 2, строки 5–7), для одного из МСКТ-томографов проанализированы два режима (строки 5: normal (120 кВ, 200 мА) и low dose (80 кВ, 10 мА)). Два набора шаблонов МПК с идентичным разведением гидрофосфата калия (один дополнительно содержал высокоплотный образец β -трикальцийфосфата) фиксировали вокруг пробирок диаметром 25 мм (см. рис. 1, а, д), которые затем помещали в цилиндр диаметром 85 мм, заполненный дистиллированной водой (см. рис. 1, б, е), который размещали в томографе (см. рис. 1, с). Водное окружение необходимо для моделирования эффекта усиления жёсткости луча (beam hardening) [10], что является одним из факторов приближения условий фантомного исследования к клиническому.

Сопоставление результатов КТ-исследования шаблонов «в воде» и «на воздухе» предполагается в дальнейшем для оценки влияния поглощающих свойств жидкой среды, собственно полости рта. Изображения были получены в формате DICOM (см. рис. 1, е; рис. 2).

Статистический анализ

Определялись значения «Mean» (Среднее), «Standard Deviation» (SD, Стандартное отклонение) для образцов МПК в шаблонах. Показатели рентгеновской плотности

соответствующих образцов МПК для двух шаблонов усреднялись. Полученные данные обрабатывались в программе Excel и Statistica 10, проводилось сопоставление показателей HU (для МСКТ), GV (для КЛКТ) и МПК. Использовались линейные и квадратичные линии аппроксимации. Кросс-калибровка проводилась относительно режима МСКТ 120 кВ, 200 мА, принятого за внутренний стандарт (см. табл. 1 столбец 4; табл. 2 строку 5). С учётом небольшого размера выборок и неоднородных условий сравнение между группами проводилось методами непараметрической статистики (Манна–Уитни).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты измерения рентгеновской плотности шаблонов МПК в HU для МСКТ и GV для КЛКТ представлены на рис. 1 и 2. Отмечается существенный разброс измеренных величин, при этом для отдельных сканеров различается измеренная рентгеновская плотность воды (для КЛКТ 2 и КЛКТ 4 отмечаются отрицательные значения GV). На рис. 2 приведено сопоставление фантома в одинаковых параметрах визуализации «окна» для костной ткани (window level 100 / window width) для МСКТ: наглядно виден разный контраст при МСКТ 3 (а) и КЛКТ 2 (б). Измеренные значения рентгеновской плотности воды –0,85 HU для МСКТ и –360 GV для КЛКТ.

Значительно различаются углы наклона и формы кривых зависимостей рентгеновской плотности от заданных значений МПК (рис. 3).

С целью унификации выполненных измерений была предложена кросс-калибровка — определение формул для пересчёта каждых конкретных измерений для разных аппаратов на универсальный внутренний стандарт, за который принят режим МСКТ 1: 120 кВ, 200 мА (см. табл. 2 строку 5). Для этого первоначально были построены зависимости в обратных координатах (рис. 4).

На рис. 4 представлены зависимости МПК от HU или GV, т.е. координаты, обратные рис. 3. Средствами Excel были построены линии аппроксимации: линейные для КЛКТ 1 и 3; МСКТ 1, 2, 3 и квадратичные для КЛКТ 2

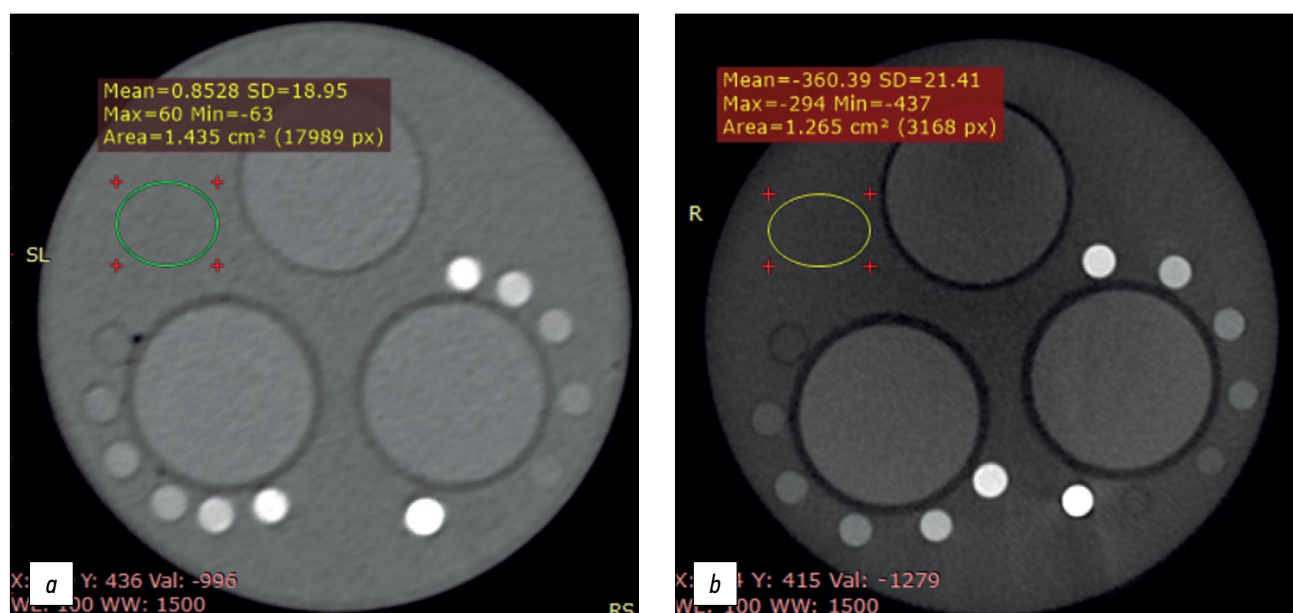


Рис. 2. Рентгеноконтрастный фантом с шаблонами минеральной плотности кости в одинаковых параметрах визуализации «окна» (window level 100 / window width 1500 для костной ткани) для исследуемых мультиспирального компьютерного томографа 3 (а) и конусно-лучевого компьютерного томографа 2 (b): визуально отмечается разный контраст, измеренные значения плотности воды: 0,85 HU для мультиспиральных и 360 GV для конусно-лучевых компьютерных томографов.

и 4 (соответствующие формулы представлены на рис. 4). Решение о применении закона аппроксимации основывалось на визуальном анализе хода зависимости. Для КЛКТ 1 зависимость была разбита на два диапазона, для каждого из которых были определены свои характеры зависимостей. Это связано с артефактами, выявленными при анализе изображений.

Полученные формулы зависимостей (см. рис. 4) позволили с помощью несложных преобразований рассчитать формулы для кросс-калибровки относительно «стандартного режима» МСКТ 120 кВ и 200 мА (см. табл. 2 строку 5). Эти формулы представлены в табл. 3 (столбец 2). Алгоритм использования данных формул состоит в том, что измеренные значения рентгеновской

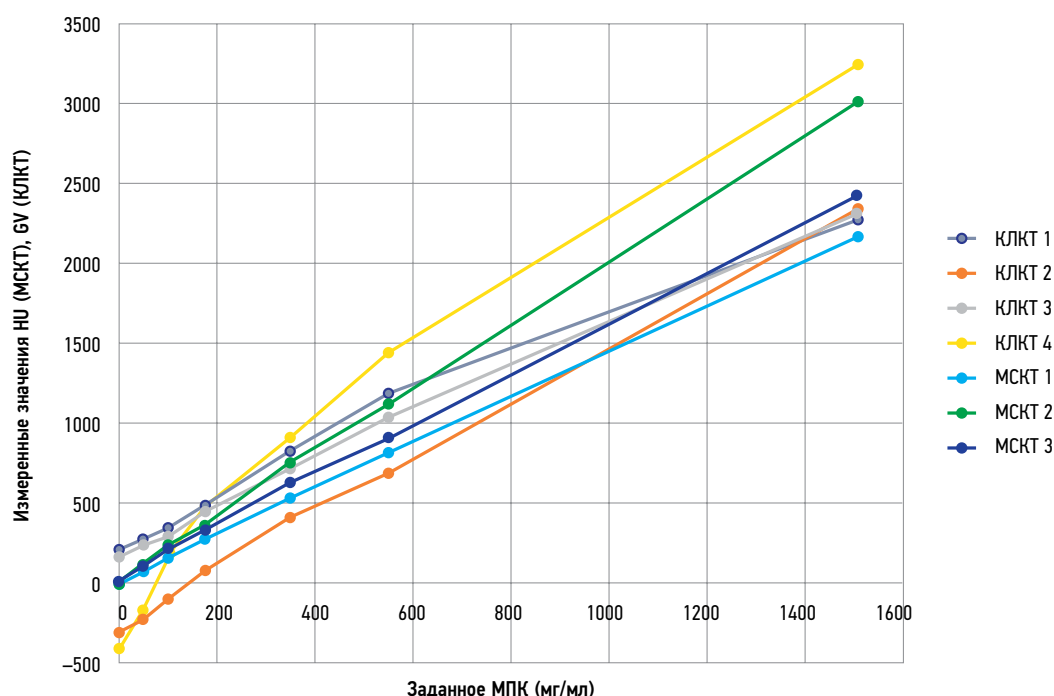


Рис. 3. Зависимость измеренных значений рентгеновской плотности (HU для МСКТ и GV для КЛКТ) от заданных значений минеральной плотности кости до проведения кросс-калибровки: отмечается выраженный разброс значений HU для разных режимов и томографов при МСКТ и GV для различных аппаратов при выполнении КЛКТ-исследований. МСКТ — мультиспиральный компьютерный томограф; КЛКТ — конусно-лучевой компьютерный томограф.

Таблица 3. Расчётные формулы кросс-калибровки для каждого исследуемого томографа

Сокращённое название томографа (в соответствии с табл. 1)	Формулы для кросс-калибровки относительно томографа МСКТ 1
КЛКТ 1 (0–350 мг/мл)	$y = 0,819 \times (x) - 164$
КЛКТ 1_1 (350–1506 мг/мл)	$y = 1,31 \times (x) - 164$
КЛКТ 2	$y = 4,4 \times 10^{-5} \times (x)^2 + 0,771 \times (x) + 234$
КЛКТ 3	$y = 1,04 \times (x) - 188$
КЛКТ 4	$y = 1,04 \times (x)^2 + 0,335 \times (x) + 120$
МСКТ 2	$y = 0,748 \times (x) - 9,14$
МСКТ 3	$y = 0,937 \times (x) - 51,5$

Примечание. В формулах (x) — измеренные значения HU или GV на соответствующем КТ-устройстве; (y) — расчётная величина для кросс-калибровки относительно КТ 1 (т.е. какой была бы плотность костной ткани в HU, на КТ 1 из табл. 1). КЛКТ 1–4 — порядковые номера исследуемых конусно-лучевых компьютерных томографов; МСКТ 2, 3 — порядковые номера исследуемых мультиспиральных компьютерных томографов.

плотности образцов костной ткани или шаблонов, выраженные в HU для МСКТ и GV для КЛКТ, подставляются в качестве сомножителя (x) в правой части формул; рассчитываемая при этом величина (y) будет соответствовать рентгеновской плотности данного образца, выраженного в HU, если бы его сканировали в МСКТ 1. Эти плотности можно оценивать по шкале C. Misch (см. табл. 1), определяя соответствующий тип костной ткани D1–5.

В соответствии с этим алгоритмом кросс-калибровки были пересчитаны плотности всех значений рентгеновской плотности для соответствующих режимов сканирования. Эти данные представлены на рис. 5. В сравнении с рис. 3 отмечается хорошая согласованность полученных данных.

ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе выполненного исследования КТ-аппараты продемонстрировали различные денситометрические показатели для одинаковых заданных значений МПК (см. рис. 3). Для воды ближе всего к нулевым значениям были показатели рентгеновской плотности МСКТ-аппаратов, определённые в HU: МСКТ 1 (1,5); МСКТ 2 (–9); МСКТ 3 (14). Для КЛКТ показаны более выраженные разбросы, выраженные в GV: КЛКТ 1 (210); КЛКТ 2 (–305); КЛКТ 3 (171); КЛКТ 4 (–400). Наиболее достоверное значение рентгеновской плотности дистиллированной воды показал МСКТ 1 с режимом сканирования 120 кВ и 200 мА, который и был выбран в качестве внутреннего референса, на который проводилась кросс-калибровка. Дальнейший характер зависимостей на рис. 3 также был разнородным как по углам наклона, так и по формам кривых (для КЛКТ 2 и 3 отмечалась выраженная нелинейность). Перестроение результатов в обратных координатах с линиями аппроксимации (см. рис. 4) позволили определить алгоритмы для кросс-калибровки относительно режима 120 кВ и 200 мА для МСКТ 1 (см. табл. 2 строку 5). Эти формулы предоставлены в табл. 3. После кросс-калибровки

показана хорошая сопоставимость пересчитанных данных относительно МСКТ 1. Медиана средней разницы измеренных значений относительно режима МСКТ 1 до кросс-калибровки составила 160 относительных единиц (HU, GV), а после пересчёта уменьшилась в 10 раз и составила 16 отн. ед. ($p=0,000$), также было достоверно показано, что несмотря на проведённую кросс-калибровку, для КЛКТ средняя разница была достоверно выше (30 отн. ед.), чем для МСКТ (8 отн. ед), $p=0,024$; сравнения проведены методом Манна–Уитни. При этом средняя относительная разница единиц плотности для двух шаблонов при КЛКТ составила 17,69%, а при МСКТ — 4,7%.

Существенный разброс относительной разности между двумя шаблонами, отличающимися пространственным расположением (см. рис. 2), и больший разброс относительно средних значений стандартного режима 120 кВ и 200 мА после кросс-калибровки при КЛКТ определяет необходимость использования синхронных шаблонов, т.е. расположенных в ротовой полости вблизи предполагаемой зоны имплантации у пациента, которому проводится исследование. Асинхронная методика, успешно применяемая при количественной КТ, может оказаться малоэффективной ввиду ряда артефактов при КЛКТ, приводящих к неоднородности сигнала [11]. Необходима калибровка для конкретного оборудования, режима и пациента.

На сегодняшний день относительные единицы HU применяются в рентгенологической классификации Carl E. Misch (см. табл. 1 столбцы 5 и 6), которая является основным этапом планирования дентальной имплантации и выбора дальнейшего хирургического протокола. В данной экспериментальной работе были смоделированы условия, когда плотности рентгеноконтрастного шаблона соответствуют основным типам костной ткани по Carl E. Misch (см. табл. 1) — D1–5. Было показано, что после кросс-калибровки возможна оценка HU как разных режимов МСКТ, так и КЛКТ методом с хорошей точностью. Данный метод финансово не затратный, а также простой в использовании.

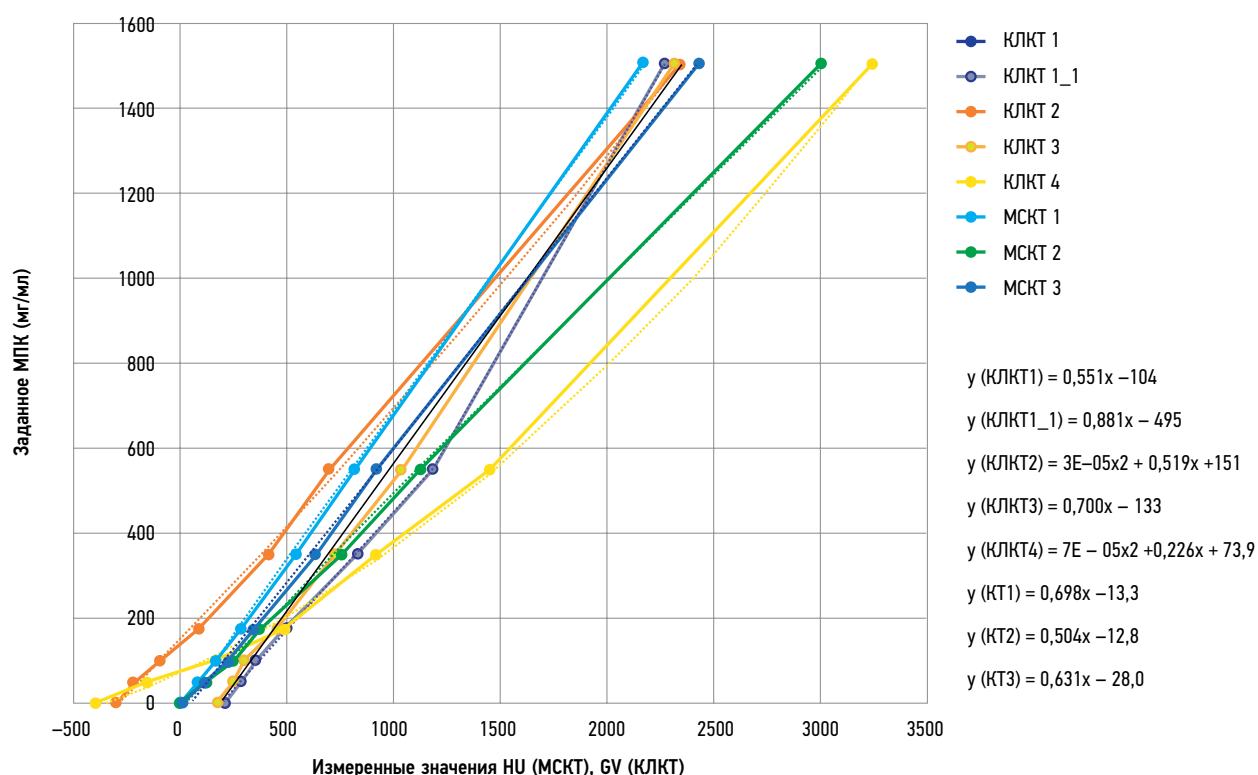


Рис. 4. Обратные зависимости по сравнению с графиками на рис. 2: минеральная плотность в зависимости от рентгеновской плотности в единицах GV и HU. Полученные линии аппроксимации были использованы при определении формул для кросс-калибровки.

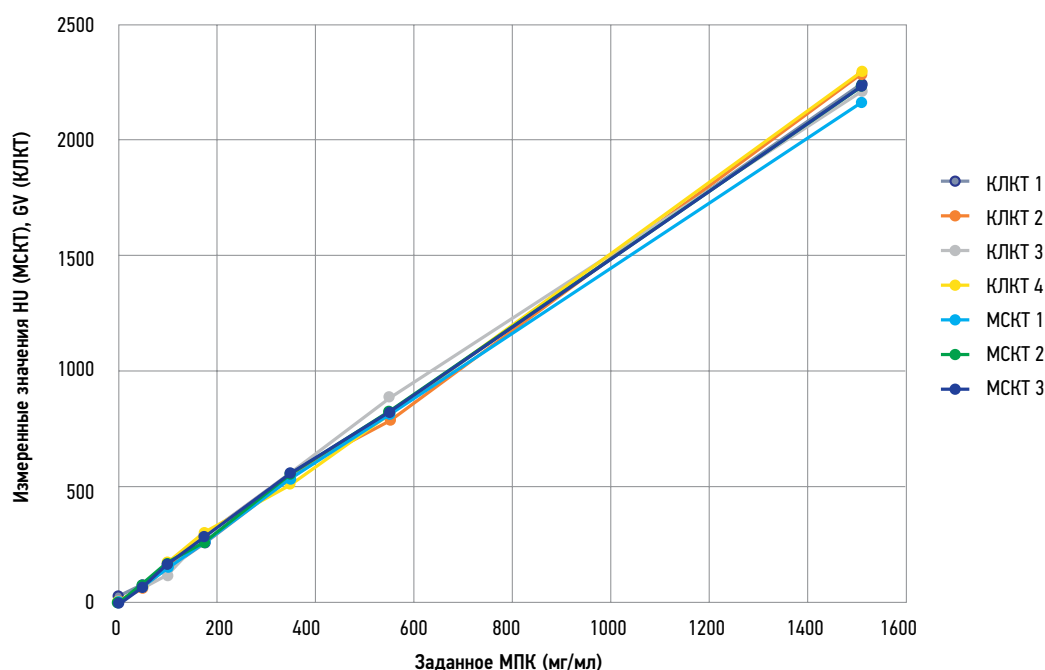


Рис. 5. Зависимость пересчитанных значений рентгеновской плотности (HU для МСКТ и GV для КЛКТ) от заданных значений минеральной плотности кости после проведения кросс-калибровки. Отмечается хорошая согласованность скорректированных данных. Кросс-калибровка проводилась относительно томографа МСКТ 1 и режима 120 кВ, 200 мА. МСКТ 1 — исследуемый мультиспиральный компьютерный томограф 1; КЛКТ — конусно-лучевой компьютерный томограф.

Насыщенный гидрофосфатом калия рентгеноконтрастный шаблон использовался в дозиметрии как материал, эквивалентный кортикальной кости, в течение многих

лет [12]. Различные разведения данного материала применялись для эталонных рентгеноконтрастных фантомов ранее и в современных условиях [11, 13]. Также в качестве

рентгеноконтрастных можно рассматривать композитные материалы на основе нерастворимого в воде гидроксиапатита или трикальцийфосфата. Рентгеновская плотность гидрофосфата калия и трикальцийфосфата изменяется согласованно с изменением энергии рентгеновского излучения, как и костная ткань [14, 15]. В данной экспериментальной работе использованы несколько значений напряжения. Нами были выбраны рекомендованные производителями режимы сканирования от 80 до 120 кВ в зависимости от вида оборудования. Согласно шкале относительных единиц плотности (НУ), денситометрические показатели воды соответствуют нулю, что задаётся при калибровке МСКТ-оборудования [1]. Ближе всего к этому значению в исследовании соответствовали МСКТ-аппараты.

Фантомы (рентгеноконтрастные шаблоны) на основе гидрофосфата калия применялись ранее для унификации измерений и дальнейшей классификации обызвествлений стенок сосудов и костной ткани [16, 17]. Сообщается, что более высокие погрешности были получены для аппаратов с низким напряжением и пространственным разрешением [18]. Факторы, которые определяют погрешности определения МПК, — это напряжение КТ-аппарата, алгоритм реконструкции, характерные артефакты рассеяния, нехватки фотонов на детекторах; в меньшей степени влияет мощность излучения (мА) [11]. Стоит учесть, что все КТ-исследования рентгеноконтрастных шаблонов проводились с погружением их в сосуд с водой с габаритами, соответствующими размеру ротовой полости и окружающих мягких тканей, что приближало модельные условия к нативному сканированию у пациентов [19].

В нашем количественном исследовании с использованием рентгеноконтрастных шаблонов предоставлены более обширные результаты, в отличие от предыдущих работ, где был оценён один тип КТ-аппаратов и один тип рентгеноконтрастного шаблона [20–23]. Использование в нашей работе оригинальных шаблонов с семью заданными значениями МПК и сравнительной оценкой 6 сканеров придаёт исследованию оригинальность и большую доказательность. Результаты исследования показали, что применение рентгеноконтрастных шаблонов позволяет стандартизировать и компенсировать недостатки денситометрической классификации ткани по КЛКТ, которые существенно влияют на планирование и проведение различных стоматологических манипуляций [24, 25].

В дальнейшем применение синхронных рентгеноконтрастных шаблонов возможно при различных видах операций в челюстно-лицевой области, в частности при дентальной имплантации. Планирование дентальной имплантации с использованием рентгеноконтрастных шаблонов позволит подобрать максимально индивидуальный хирургический протокол [26–30]. При сравнении КЛКТ и МСКТ отмечается схожий характер зависимостей плотности костной ткани, однако отдельные измерения значительно различаются [26]. Разработанный нами алгоритм

кросс-калибровки позволяет значимо снизить данные различия.

Помимо погрешностей определения МПК в КЛКТ существенную роль играет оценка геометрических искажений [31–34]. В исследовании J. Medelnik и соавт. [35] оценили воспроизводимость анатомических ориентиров и точность различных КЛКТ и МСКТ. Н. Elshenawy и соавт. [36] отметили, что увеличение размера поля исследования вместе с размером вокселя может отрицательно сказаться на точности линейных измерений КЛКТ, особенно при оценке небольших расстояний. Авторы отмечают, что помимо оценки геометрических искажений актуальна максимально точная оценка плотности объектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный рентгеноконтрастный шаблон демонстрирует большой разброс рентгеновской плотности по данным четырёх КЛКТ и двух МСКТ для одинаковых образцов минеральной плотности кости. Применение кросс-калибровки позволяет стандартизировать денситометрические показатели для КЛКТ и различных МСКТ-режимов, при этом разброс снижается в 10 раз, что обеспечивает возможность классификации костной ткани по С. Misch. Наиболее перспективно применение индивидуальных синхронных шаблонов, находящихся непосредственно у зоны предполагаемого стоматологического вмешательства.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Источник финансирования. Данная статья подготовлена в рамках НИОКР «Разработка и создание аппаратно-программного комплекса для оппортунистического скрининга остеопороза» (№ ЕГИСУ: 123031400007-7).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства 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 распределён следующим образом: Ш.Д. Хоссаин, А.Б. Данаев, А.А. Долгалева — написание текста статьи, выполнение экспериментальной части исследований; А.А. Мураев, Д.В. Буренчев, С.Ю. Иванов — концепция и дизайн исследования; А.В. Петрайкин, Ю.А. Васильев, Д.Е. Шарова — анализ полученных данных.

ADDITIONAL INFORMATION

Funding source. This article was prepared by the authors as part of the research and development work (EGISU number: 123031400007-7) in accordance with the Program of the Moscow Department of Health for 2023–2025.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the

version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work. Sh.D. Hossain, A.B. Danaev, A.A. Dolgalev — writing the text of the article, performing the experimental part of the research; A.A. Muraev, D.V. Burenchev, S.Yu. Ivanov — study concept and design; A.V. Petraikin, Yu.A. Vasilev, D.E. Sharova — data analysis.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hounsfield G.N. Computerized transverse axial scanning (tomography). Description of system // *Br J Radiol*. 1973. Vol. 46, N 552. P. 1016–1022. doi: 10.1259/0007-1285-46-552-1016
2. Bornstein M.M., Scarfe W.C., Vaughn V.M., Jacobs R. Cone beam computed tomography in implant dentistry: A systematic review focusing on guidelines, indications, and radiation dose risks // *Int J Oral Maxillofac Implants*. 2014. Vol. 29, Suppl. P. 55–77. doi: 10.11607/jomi.2014suppl.g1.4
3. DenOtter T.D., Schubert J. Hounsfield Unit. In: *StatPearls*. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; March 9, 2022.
4. Kim Y., Oh T.J., Misch C.E., Wang H.L. Occlusal considerations in implant therapy: Clinical guidelines with biomechanical rationale // *Clin Oral Implants Res*. 2005. Vol. 16, N 1. P. 26–35. doi: 10.1111/j.1600-0501.2004.01067.x
5. Woelber J.P., Fleiner J., Rau J., et al. Accuracy and usefulness of CBCT in periodontology: A systematic review of the literature // *Int J Periodontics Restorative Dent*. 2018. Vol. 38, N 2. P. 289–297. doi: 10.11607/prd.2751
6. Song D., Shujaat S., de Faria Vasconcelos K., et al. Diagnostic accuracy of CBCT versus intraoral imaging for assessment of peri-implant bone defects // *BMC Med Imaging*. 2021. Vol. 21, N 1. P. 23. doi: 10.1186/s12880-021-00557-9
7. Savoldi F., Yon M.J., Kwok V.M., et al. Accuracy of CBCT in the identification of mental, lingual, and retromolar foramina: A comparison with visual inspection of human dry mandibles // *Int J Periodontics Restorative Dent*. 2021. Vol. 4, N 6. P. e277–e286. doi: 10.11607/prd.4770
8. Levi C., Gray J.E., McCullough E.C., Hattery R.R. The unreliability of CT numbers as absolute values // *AJR Am J Roentgenol*. 1982. Vol. 139, N 3. P. 443–447. doi: 10.2214/ajr.139.3.443
9. Петрайкин А.В., Скрипникова И.А. Количественная компьютерная томография, современные данные. Обзор // *Медицинская визуализация*. 2021. Т. 25, № 4. С. 134–146. doi: 10.24835/1607-0763-1049
10. Иванов Д.В., Кириллова И.В., Коссович Л.Ю., и др. Влияние конволюционных ядер и эффекта «упрочнения луча» на оценку минеральной плотности губчатой костной ткани с использованием количественной компьютерной томографии // *Известия Саратовского университета*. 2020. Т. 20, № 2. С. 205–219. doi: 10.18500/1816-9791-2020-20-2-205-219
11. Петрайкин А.В., Сморгачева А.К., Кудрявцев Н.Д., и др. Сравнение двух методик асинхронной КТ-денситометрии // *Медицинская визуализация*. 2020. Т. 24, № 4. С. 108–118. doi: 10.24835/1607-0763-2020-4-108-118
12. Witt R.M., Cameron J.R. Bone Standards. USAEC Progress Report COO-1422-42, US Atomic Energy Commission, Madison, Wisconsin, 1969.
13. Cann C.E., Genant H.K. Precise measurement of vertebral mineral content using computed tomography // *J Comput Assist Tomogr*. 1980. Vol. 4, N 4. P. 493–500. doi: 10.1097/00004728-198008000-00018
14. Hubbell J.H. Photon cross sections, attenuation coefficients, and energy absorption coefficients from 10 keV to 100 GeV. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 1969. doi: 10.6028/NBS.NSRDS.29
15. International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU). Tissue Substitutes in Radiation Dosimetry and Measurement // *ICRU Report*. 1989. N 44. P. 1–189.
16. Николаев А.Е., Коркунова О.А., Блохин И.А., и др. Плотность кальцификации при компьютерной томографии в зависимости от параметров сканирования: фантомное исследование // *Медицинская визуализация*. 2020. Т. 24, № 4. С. 119–132. doi: 10.24835/1607-0763-2020-4-119-132
17. Gaur A., Dhillon M., Puri N., et al. Questionable accuracy of CBCT in determining bone density: A comparative CBCT-CT in vitro study // *Dent Med Probl*. 2022. Vol. 59, N 3. P. 413–419. doi: 10.17219/dmp/143504
18. Martinez C., de Molina C., Desco M., Abella M. Optimization of a calibration phantom for quantitative radiography // *Med Phys*. 2021. Vol. 48, N 3. P. 1039–1053. doi: 10.1002/mp.14638
19. Hu Z., Wang T., Pan X., et al. Comparison of diagnosis of cracked tooth using contrast-enhanced CBCT and micro-CT // *Dentomaxillofac Radiol*. 2021. Vol. 50, N 7. P. 20210003. doi: 10.1259/dmfr.20210003
20. Lehmann L., Alvarez R., Macovski A., et al. Generalized image combinations in dual KVP digital radiography // *Med Phys*. 1981. Vol. 8, N 5. P. 659–667. doi: 10.1118/1.595025
21. Chuang K.S., Huang H. Comparison of four dual energy image decomposition methods // *Physics Med Biol*. 1988. Vol. 33, N 4. P. 455. doi: 10.1088/0031-9155/33/4/005
22. Gingold E.L., Hasegawa B.H. Systematic bias in basis material decomposition applied to quantitative dual-energy X-ray imaging // *Med Phys*. 1992. Vol. 9, N 1. P. 25–33. doi: 10.1118/1.596889
23. Cardinal H.N., Fenster A. An accurate method for direct dual-energy calibration and decomposition // *Med Phys*. 1990. Vol. 17, N 3. P. 327–341. doi: 10.1118/1.596512
24. Jacobs R., Salmon B., Codari M., et al. Cone beam computed tomography in implant dentistry: Recommendations for clinical use // *BMC Oral Health*. 2018. Vol. 18, N 1. P. 88. doi: 10.1186/s12903-018-0523-5
25. Долгалева А.А., Данаев А.Б., Юсупов Р.Д., и др. Объективная оценка погрешности показателей плотности при проведении конусно-лучевой компьютерной томографии в стоматологической практике // *Медицинский алфавит*. 2022. № 7. С. 65–68. doi: 10.33667/2078-5631-2022-7-65-68
26. Cassetta M., Stefanelli L.V., Di Carlo S., et al. The accuracy of CBCT in measuring jaws bone density // *Eur Rev Med Pharmacol Sci*. 2012. Vol. 16, N 10. P. 1425–1429.
27. Harvey S., Patel S. Guidelines and template for reporting on CBCT scans // *Br Dent J*. 2020. Vol. 228, N 1. P. 15–18. doi: 10.1038/s41415-019-1115-8

28. Cassetta M., Stefanelli L.V., Pacifici A., et al. How accurate is CBCT in measuring bone density? A comparative CBCT-CT in vitro study // *Clin Implant Dent Relat Res*. 2014. Vol. 16, N 4. P. 471–478. doi: 10.1111/cid.12027
29. Parsa A., Ibrahim N., Hassan B., et al. Bone quality evaluation at dental implant site using multislice CT, micro-CT, and cone beam CT // *Clin Oral Implants Res*. 2015. Vol. 26, N 1. P. e1–7. doi: 10.1111/clr.12315
30. Van Dessel J., Nicolielo L.F., Huang Y., et al. Accuracy and reliability of different cone beam computed tomography (CBCT) devices for structural analysis of alveolar bone in comparison with multislice CT and micro-CT // *Eur J Oral Implantol*. 2017. Vol. 10, N 1. P. 95–105.
31. Dillenseger J.P., Matern J.F., Gros C.I., et al. MSCT versus CBCT: Evaluation of high-resolution acquisition modes for dento-maxillary and skull-base imaging // *Eur Radiol*. 2015. Vol. 25, N 2. P. 505–515. doi: 10.1007/s00330-014-3439-8
32. Schegerer A.A., Lechel U., Ritter M., et al. Dose and image quality of cone-beam computed tomography as compared with conventional multislice computed tomography in abdominal imaging // *Invest Radiol*. 2014. Vol. 49, N 10. P. 675–684. doi: 10.1097/RLI.000000000000069
33. Veldhoen S., Schöllchen M., Hanken H., et al. Performance of cone-beam computed tomography and multidetector computed tomography in diagnostic imaging of the midface: A comparative study on Phantom and cadaver head scans // *Eur Radiol*. 2017. Vol. 27, N 2. P. 790–800. doi: 10.1007/s00330-016-4387-2
34. Grunz J.P., Weng A.M., Gietzen C.H., et al. Evaluation of ultra-high-resolution cone-beam CT prototype of twin robotic radiography system for cadaveric wrist imaging // *Acad Radiol*. 2021. Vol. 28, N 10. P. e314–e322. doi: 10.1016/j.acra.2020.06.018
35. Medelnik J., Hertrich K., Steinhäuser-Andresen S., et al. Accuracy of anatomical landmark identification using different CBCT- and MSCT-based 3D images: An in vitro study // *J Orofac Orthop*. 2011. Vol. 72, N 4. P. 261–278. doi: 10.1007/s00056-011-0032-5
36. Elshenawy H., Aly W., Salah N., et al. Influence of small, midi, medium and large fields of view on accuracy of linear measurements in CBCT imaging: Diagnostic accuracy study // *Open Access Maced J Med Sci*. 2019. Vol. 7, N 6. P. 1037–1041. doi: 10.3889/oamjms.2019.232

REFERENCES

1. Hounsfield GN. Computerized transverse axial scanning (tomography). Description of system. *Br J Radiol*. 1973;46(552): 1016–1022. doi: 10.1259/0007-1285-46-552-1016
2. Bornstein MM, Scarfe WC, Vaughn VM, Jacobs R. Cone beam computed tomography in implant dentistry: A systematic review focusing on guidelines, indications, and radiation dose risks. *Int J Oral Maxillofac Implants*. 2014;29(Suppl):55–77. doi: 10.11607/jomi.2014suppl.g1.4
3. DenOtter TD, Schubert J. Hounsfield Unit. In: StatPearls. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2022.
4. Kim Y, Oh TJ, Misch CE, Wang HL. Occlusal considerations in implant therapy: Clinical guidelines with biomechanical rationale. *Clin Oral Implants Res*. 2005;16(1):26–35. doi: 10.1111/j.1600-0501.2004.01067.x
5. Woelber JP, Fleiner J, Rau J, et al. Accuracy and usefulness of CBCT in periodontology: A systematic review of the literature. *Int J Periodontics Restorative Dent*. 2018;38(2):289–297. doi: 10.11607/prd.2751
6. Song D, Shujaat S, de Faria Vasconcelos K, et al. Diagnostic accuracy of CBCT versus intraoral imaging for assessment of peri-implant bone defects. *BMC Med Imaging*. 2021;21(1):23. doi: 10.1186/s12880-021-00557-9
7. Savoldi F, Yon MJ, Kwok VM, et al. Accuracy of CBCT in the identification of mental, lingual, and retromolar foramina: A comparison with visual inspection of human dry mandibles. *Int J Periodontics Restorative Dent*. 2021;41(6):e277–e286. doi: 10.11607/prd.4770
8. Levi C, Gray JE, McCullough EC, Hattery RR. The unreliability of CT numbers as absolute values. *AJR Am J Roentgenol*. 1982;139(3): 443–447. doi: 10.2214/ajr.139.3.443
9. Petraikin AV, Skripnikova IA. Quantitative computed tomography, modern data. Review. *Medical Imaging*. 2021;25(4):134–146. (In Russ). doi: 10.24835/1607-0763-1049
10. Ivanov DV, Kirillova IV, Kossovich LY, et al. Influence of convolution kernel and beam-hardening effect on the assessment of trabecular bonemineral density using quantitative computed tomography. *News Saratov University*. 2020;20(2):205–219. (In Russ). doi: 10.18500/1816-9791-2020-20-2-205-219
11. Petraikin AV, Smorchkova AK, Kudryavtsev ND, et al. Comparison of two asynchronous QCT methods. *Medical Imaging*. 2020;24(4): 108–118. (In Russ). doi: 10.24835/1607-0763-2020-4-108-118
12. Witt RM, Cameron JR. Bone Standards. USAEC Progress Report No. COO-1422-42 US Atomic Energy Commission, Madison, Wisconsin; 1969.
13. Cann CE, Genant HK. Precise measurement of vertebral mineral content using computed tomography. *J Comput Assist Tomogr*. 1980;4(4):493–500. doi: 10.1097/00004728-198008000-00018
14. Hubbell JH. Photon cross sections, attenuation coefficients, and energy absorption coefficients from 10 keV to 100 GeV. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD; 1969. doi: 10.6028/NBS.NSRDS.29
15. International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU). Tissue Substitutes in Radiation Dosimetry and Measurement. *ICRU Report*. 1989;(44):1–189.
16. Nikolaev AE, Korkunova OA, Blokhin IA, et al. Calcification density on computed tomography depending on scanning parameters: Phantom study. (In Russ). *Med Imaging*. 2020;24(4):119–132. doi: 10.24835/1607-0763-2020-4-119-132
17. Gaur A, Dhillon M, Puri N, et al. Questionable accuracy of CBCT in determining bone density: A comparative CBCT-CT in vitro study. *Dent Med Probl*. 2022;59(3):413–419. doi: 10.17219/dmp/143504
18. Martinez C, de Molina C, Desco M, Abella M. Optimization of a calibration phantom for quantitative radiography. *Med Phys*. 2021;48(3):1039–1053. doi: 10.1002/mp.14638
19. Hu Z, Wang T, Pan X, et al. Comparison of diagnosis of cracked tooth using contrast-enhanced CBCT and micro-CT. *Dentomaxillofac Radiol*. 2021;50(7):20210003. doi: 10.1259/dmfr.20210003
20. Lehmann L, Alvarez R, Macovski A, et al. Generalized image combinations in dual KVP digital radiography. *Med Phys*. 1981;8(5):659–667. doi: 10.1118/1.595025

21. Chuang KS, Huang H. Comparison of four dual energy image decomposition methods. *Physics Med Biol.* 1988;33(4):455. doi: 10.1088/0031-9155/33/4/005
22. Gingold EL, Hasegawa BH. Systematic bias in basis material decomposition applied to quantitative dual-energy X-ray imaging. *Med Phys.* 1992;19(1):25–33. doi: 10.1088/0031-9155/33/4/005
23. Cardinal HN, Fenster A. An accurate method for direct dual-energy calibration and decomposition. *Med Phys.* 1990;17(3):327–341. doi: 10.1118/1.596512
24. Jacobs R, Salmon B, Codari M, et al. Cone beam computed tomography in implant dentistry: recommendations for clinical use. *BMC Oral Health.* 2018;18(1):88. doi: 10.1186/s12903-018-0523-5
25. Dolgalev AA, Danaev AB, Yusupov RD, et al. Objective assessment of measurement error in significant cone-beam computed tomography in dental practice. *Med Alphabet.* 2022;(7):65–68. (In Russ). doi: 10.33667/2078-5631-2022-7-65-68
26. Cassetta M, Stefanelli LV, Di Carlo S, et al. The accuracy of CBCT in measuring jaws bone density. *Eur Rev Med Pharmacol Sci.* 2012;16(10):1425–1429.
27. Harvey S, Patel S. Guidelines and template for reporting on CBCT scans. *Br Dent J.* 2020;228(1):15–18. doi: 10.1038/s41415-019-1115-8
28. Cassetta M, Stefanelli LV, Pacifici A, et al. How accurate is CBCT in measuring bone density? A comparative CBCT-CT in vitro study. *Clin Implant Dent Relat Res.* 2014;16(4):471–478. doi: 10.1111/cid.12027
29. Parsa A, Ibrahim N, Hassan B, et al. Bone quality evaluation at dental implant site using multislice CT, micro-CT, and cone beam CT. *Clin Oral Implants Res.* 2015;26(1):e1–7. doi: 10.1111/clr.12315
30. Van Dessel J, Nicolielo LF, Huang Y, et al. Accuracy and reliability of different cone beam computed tomography (CBCT) devices for structural analysis of alveolar bone in comparison with multislice CT and micro-CT. *Eur J Oral Implantol.* 2017;10(1):95–105.
31. Dillenseger JP, Matern JF, Gros CI, et al. MSCT versus CBCT: Evaluation of high-resolution acquisition modes for dento-maxillary and skull-base imaging. *Eur Radiol.* 2015;25(2):505–515. doi: 10.1007/s00330-014-3439-8
32. Schegerer AA, Lechel U, Ritter M, et al. Dose and image quality of cone-beam computed tomography as compared with conventional multislice computed tomography in abdominal imaging. *Invest Radiol.* 2014;49(10):675–684. doi: 10.1097/RLI.000000000000069
33. Veldhoen S, Schöllchen M, Hanken H, et al. Performance of cone-beam computed tomography and multidetector computed tomography in diagnostic imaging of the midface: A comparative study on Phantom and cadaver head scans. *Eur Radiol.* 2017;27(2):790–800. doi: 10.1007/s00330-016-4387-2
34. Grunz JP, Weng AM, Gietzen CH, et al. Evaluation of ultra-high-resolution cone-beam CT prototype of twin robotic radiography system for cadaveric wrist imaging. *Acad Radiol.* 2022;28(10):e314–e322. doi: 10.1016/j.acra.2020.06.018
35. Medelnic J, Hertrich K, Steinhäuser-Andresen S, et al. Accuracy of anatomical landmark identification using different CBCT- and MSCT-based 3D images: An in vitro study. *J Orofac Orthop.* 2011;72(4):261–278. doi: 10.1007/s00056-011-0032-5
36. Elshenawy H, Aly W, Salah N, et al. Influence of small, midi, medium and large fields of view on accuracy of linear measurements in CBCT imaging: Diagnostic accuracy study. *Open Access Maced J Med Sci.* 2019;7(6):1037–1041. doi: 10.3889/oamjms.2019.232

ОБ АВТОРАХ

* **Петрайкин Алексей Владимирович**, д-р мед. наук, доцент, гл. науч. сотр.;

адрес: Россия, 127051, Москва, ул. Петровка, д. 24, стр. 1;

ORCID: 0000-0003-1694-4682;

eLibrary SPIN: 6193-1656;

e-mail: alexeypetraikin@gmail.com

Хоссаин Шазмим Джахан, ассистент;

ORCID: 0000-0002-5410-1849;

eLibrary SPIN: 3760-3732;

e-mail: shazmim@mail.ru

Мурьев Александр Александрович, д-р мед. наук, профессор;

ORCID: 0000-0003-3982-5512;

eLibrary SPIN: 1431-5936;

e-mail: muraev_aa@pfur.ru

Данаев Аслан Барадинович, ассистент;

ORCID: 0000-0003-4754-3101;

eLibrary SPIN: 7266-7722;

e-mail: aslandanaev111@mail.ru

Буренчев Дмитрий Владимирович, д-р мед. наук, гл. науч. сотр.;

ORCID: 0000-0003-2894-6255;

eLibrary SPIN: 2411-3959;

e-mail: BurenchevDV@zdrav.mos.ru

AUTHORS' INFO

* **Alexey V. Petraikin**, MD, Dr. Sci. (Med.), Assistant Professor, Chief Researcher;

address: 24/1 Petrovka street, 127051 Moscow, Russia;

ORCID: 0000-0003-1694-4682;

eLibrary SPIN: 6193-1656;

e-mail: alexeypetraikin@gmail.com

Shazmim D. Hossain, Assistant Lecturer;

ORCID: 0000-0002-5410-1849;

eLibrary SPIN: 3760-3732;

e-mail: shazmim@mail.ru

Alexandr A. Muraev, MD, Dr. Sci. (Med.), Professor;

ORCID: 0000-0003-3982-5512;

eLibrary SPIN: 1431-5936;

e-mail: muraev_aa@pfur.ru

Aslan B. Danaev, Assistant Lecturer;

ORCID: 0000-0003-4754-3101;

eLibrary SPIN: 7266-7722;

e-mail: aslandanaev111@mail.ru

Dmitry V. Burenchev, MD, Dr. Sci. (Med.), Chief Researcher;

ORCID: 0000-0003-2894-6255;

eLibrary SPIN: 2411-3959;

e-mail: BurenchevDV@zdrav.mos.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Долгалева Александр Александрович, д-р мед. наук, доцент;
ORCID: 0000-0002-6352-6750;
eLibrary SPIN: 5941-5771;
e-mail: dolgalev@dolgalev.pro

Васильев Юрий Александрович, канд. мед. наук;
ORCID: 0000-0002-0208-5218;
eLibrary SPIN: 4458-5608;
e-mail: VasilevYA1@zdrav.mos.ru

Шарова Дарья Евгеньевна;
ORCID: 0000-0001-5792-3912;
eLibrary SPIN: 1811-7595;
e-mail: SharovaDE@zdrav.mos.ru

Иванов Сергей Юрьевич, д-р мед. наук, профессор,
чл.-корр. РАН;
ORCID: 0000-0001-5458-0192;
eLibrary SPIN: 2607-2679;
e-mail: syivanov@yandex.ru

Alexander A. Dolgalev, MD, Dr. Sci. (Med.), Assistant Professor;
ORCID: 0000-0002-6352-6750;
eLibrary SPIN: 5941-5771;
e-mail: dolgalev@dolgalev.pro

Yuriy A. Vasilev, MD, Cand. Sci. (Med.);
ORCID: 0000-0002-0208-5218;
eLibrary SPIN: 4458-5608;
e-mail: VasilevYA1@zdrav.mos.ru

Dariya E. Sharova;
ORCID: 0000-0001-5792-3912;
eLibrary SPIN: 1811-7595;
e-mail: SharovaDE@zdrav.mos.ru

Sergey Yu. Ivanov, MD, Dr. Sci. (Med.), Professor, Corresponding
Member of the Russian Academy of Sciences;
ORCID: 0000-0001-5458-0192;
eLibrary SPIN: 2607-2679;
e-mail: syivanov@yandex.ru

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD529668>

Терминология рака прямой кишки: консенсусное соглашение Рабочей группы экспертов ROPR, AOP и PATPO

Т.П. Березовская¹, Н.А. Рубцова², В.Е. Синицын³, И.В. Зароднюк⁴, Н.В. Нуднов⁵, А.В. Мищенко⁶, Ю.Л. Трубачева⁴, Т.А. Берген⁷, П.Ю. Гришко⁶, С.С. Балясникова⁸, Я.А. Дайнеко¹, Д.В. Рыжкова⁹, М.М. Ходжибекова², Н.А. Ручьева¹⁰, И.Е. Тюрин⁸, С.И. Ачкасов⁴, А.А. Невольских¹, С.С. Гордеев⁸, И.В. Дрошнев²

¹ Медицинский радиологический научный центр имени А.Ф. Цыба — филиал ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр радиологии», Обнинск, Российская Федерация;

² Московский научно-исследовательский онкологический институт имени П.А. Герцена — филиал ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр радиологии», Москва, Российская Федерация;

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, факультет фундаментальной медицины, Москва, Российская Федерация;

⁴ Национальный медицинский исследовательский центр колопроктологии имени А.Н. Рыжих, Москва, Российская Федерация;

⁵ Российский научный центр рентгенорадиологии, Москва, Российская Федерация;

⁶ Национальный медицинский исследовательский центр онкологии имени Н.Н. Петрова, Москва, Российская Федерация;

⁷ Национальный медицинский исследовательский центр имени академика Е.Н. Мешалкина, Москва, Российская Федерация;

⁸ Национальный медицинский исследовательский центр онкологии имени Н.Н. Блохина, Москва, Российская Федерация;

⁹ Национальный медицинский исследовательский центр имени В.А. Алмазова, Москва, Российская Федерация;

¹⁰ Национальный медицинский исследовательский центр трансплантологии и искусственных органов имени академика В.И. Шумакова, Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Унифицированная терминология — необходимое условие успешной междисциплинарной коммуникации в онкологии. Многообразие анатомических, патоморфологических и клинических терминов, используемых при раке прямой кишки, нередко сопровождается неоднозначной их трактовкой как в отечественной, так и зарубежной научной литературе. Это не только усложняет взаимодействие между специалистами, но и затрудняет сравнение результатов лечения рака прямой кишки, полученных в разных лечебных учреждениях.

На основе анализа современной отечественной и международной научно-методической литературы по раку прямой кишки были отобраны ключевые термины, используемые при диагностике и планировании лечения злокачественного новообразования, с последующим двукратным онлайн-обсуждением их трактовок экспертами Российского общества рентгенологов и радиологов, Ассоциации онкологов России и Российской ассоциации терапевтических радиационных онкологов до достижения консенсуса ($\geq 80\%$) экспертов по всем пунктам. Термины, по которым консенсус не был достигнут, не включены в итоговый список.

В результате работы составлен список анатомических, патоморфологических и клинических терминов, используемых при диагностике, стадировании и планировании лечения рака прямой кишки, и на основе консенсуса экспертов определена их трактовка.

Предложен словарь терминов, рекомендуемых при описании и формулировке заключения диагностических исследований у пациентов с раком прямой кишки.

Ключевые слова: рак прямой кишки; стадирование; неoadъювантное лечение; хирургическое лечение; магнитно-резонансная томография; МРТ; лучевая диагностика.

Как цитировать:

Березовская Т.П., Рубцова Н.А., Синицын В.Е., Зароднюк И.В., Нуднов Н.В., Мищенко А.В., Трубачева Ю.Л., Берген Т.А., Гришко П.Ю., Балясникова С.С., Дайнеко Я.А., Рыжкова Д.В., Ходжибекова М.М., Ручьева Н.А., Тюрин И.Е., Ачкасов С.И., Невольских А.А., Гордеев С.С., Дрошнев И.В. Терминология рака прямой кишки: консенсусное соглашение Рабочей группы экспертов ROPR, AOP и PATPO // *Digital Diagnostics*. 2023. Т. 4, № 3. С. 306–321. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD529668>

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD529668>

Terminology of rectal cancer: consensus agreement of the expert working group

Tatiana P. Berezovskaya¹, Natalia A. Rubtsova², Valentin E. Sinitsyn³, Irina V. Zarodnyuk⁴, Nicolai V. Nudnov⁵, Andrei V. Mishchenko⁶, Yuliya L. Trubacheva⁴, Tatiana A. Bergen⁷, Pavel Yu. Grishko⁶, Svetlana S. Balyasnikova⁸, Yana A. Dayneko¹, Darya V. Ryjkova⁹, Malika M. Hodzhibekova², Nataliya A. Rucheva¹⁰, Igor E. Turin⁸, Sergey I. Achkasov⁴, Alexey A. Nevolskikh¹, Sergey S. Gordeev⁸, Inna V. Droshneva²

¹ A.F. Tsyba Medical Radiological Research Center — branch National Medical Research Radiological Center, Obninsk, Russian Federation;

² P.A. Herzen Moscow Research Oncological Institute — branch National Medical Research Radiological Center, Moscow, Russian Federation;

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation;

⁴ State Scientific Centre of Coloproctology, Moscow, Russian Federation;

⁵ Russian Scientific Center of Roentgenoradiology, Moscow, Russian Federation;

⁶ N.N. Petrov National Medical Research Centre of Oncology, Moscow, Russian Federation;

⁷ E. Meshalkin National Medical Research Center, Moscow, Russian Federation;

⁸ N.N. Blokhin National Medical Research Center of Oncology, Moscow, Russian Federation;

⁹ Almazov National Medical Research Centre, Moscow, Russian Federation;

¹⁰ V.I. Shumakov National Medical Research Center of Transplantology and Artificial Organs, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Unified terminology is a necessary condition for successful interdisciplinary communication within the field of oncology. The variety of anatomical, pathomorphological, and clinical terms used in rectal cancer is often accompanied by their ambiguous interpretation both in domestic and foreign scientific literature. This not only complicates the interaction between specialists, but also complicates the comparison of the results of rectal cancer treatment obtained in different medical institutions.

Based on the analysis of recent domestic and international scientific and methodological literature on rectal cancer, the key terms used in the diagnosis and treatment planning of rectal cancer were selected, followed by a two-time online discussion of their interpretations by experts from the Russian Society of Radiologists and Therapeutic Radiation Oncologists, the Association of Oncologists of Russia, and the Russian Association of Therapeutic Radiation Oncologists until reaching consensus ($\geq 80\%$) of experts on all items. Terms that fail to attain consensus were excluded in the final list.

A list of anatomical, pathomorphological, and clinical terms used in the diagnosis, staging, and treatment planning of rectal cancer has been compiled and, based on expert consensus, their interpretation has been determined.

A lexicon recommended in the description and formulation of the conclusion of diagnostic studies in patients with rectal cancer is proposed.

Keywords: rectal cancer; staging; neoadjuvant treatment; surgical treatment; magnetic resonance imaging; radiology.

To cite this article:

Berezovskaya TP, Rubtsova NA, Sinitsyn VE, Zarodnyuk IV, Nudnov NV, Mishchenko AV, Trubacheva YuL, Bergen TA, Grishko PYu, Balyasnikova SS, Dayneko YaA, Ryjkova DV, Hodzhibekova MM, Rucheva NA, Turin IE, Achkasov SI, Nevolskikh AA, Gordeev SS, Droshneva IV. Terminology of rectal cancer: consensus agreement of the expert working group. *Digital Diagnostics*. 2023;4(3):306–321. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD529668>

Received: 03.07.2023

Accepted: 10.07.2023

Published: 04.09.2023

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD529668>

直肠癌术语：RSR、AOR和RATRO专家工作组达成的一致意见

Tatiana P. Berezovskaya¹, Natalia A. Rubtsova², Valentin E. Sinitsyn³, Irina V. Zarodnyuk⁴, Nicolai V. Nudnov⁵, Andrei V. Mishchenko⁶, Yuliya L. Trubacheva⁴, Tatiana A. Bergen⁷, Pavel Yu. Grishko⁶, Svetlana S. Balyasnikova⁸, Yana A. Dayneko¹, Darya V. Ryjkova⁹, Malika M. Hodzhibekova², Nataliya A. Rucheva¹⁰, Igor E. Turin⁸, Sergey I. Achkasov⁴, Alexey A. Nevolskikh¹, Sergey S. Gordeev⁸, Inna V. Droshneva²

¹ A.F. Tsyba Medical Radiological Research Center — branch National Medical Research Radiological Center, Obninsk, Russian Federation;

² P.A. Herzen Moscow Research Oncological Institute — branch National Medical Research Radiological Center, Moscow, Russian Federation;

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation;

⁴ State Scientific Centre of Coloproctology, Moscow, Russian Federation;

⁵ Russian Scientific Center of Roentgenoradiology, Moscow, Russian Federation;

⁶ N.N. Petrov National Medical Research Centre of Oncology, Moscow, Russian Federation;

⁷ E. Meshalkin National Medical Research Center, Moscow, Russian Federation;

⁸ N.N. Blokhin National Medical Research Center of Oncology, Moscow, Russian Federation;

⁹ Almazov National Medical Research Centre, Moscow, Russian Federation;

¹⁰ V.I. Shumakov National Medical Research Center of Transplantology and Artificial Organs, Moscow, Russian Federation

简评

统一术语是肿瘤学跨学科交流取得成功的必要条件。直肠癌的解剖学、病理形态学和临床术语多种多样，国内外科学文献对这些术语的解释往往模棱两可。这不仅使专科医生之间的交流变得复杂，而且难以比较不同医疗机构的直肠癌治疗效果。

根据对国内外关于直肠癌的现代科学和方法学文献的分析，选出了恶性肿瘤诊断和治疗计划中使用的关键术语，然后由俄罗斯放射科医师协会（Russian Society of Radiology, RSR）、俄罗斯肿瘤科医生协会（Associations of Oncologists of Russia, AOR）和俄罗斯医疗放射肿瘤科医生协会（Russian Association of Therapeutic Radiation Oncologists, RATRO）的专家对这些术语的解释进行了两次在线讨论，直到专家们就所有项目达成共识（≥80%）。未达成共识的术语没有被纳入最终清单。

这项研究产生了一份用于直肠癌诊断、分期和治疗计划的解剖学、病理形态学和临床术语清单，并通过专家共识确定了这些术语的释义。

建议一份术语表，用于描述和制定直肠癌患者诊断检查的结论。

关键词：直肠癌；分期；肿瘤辅助治疗；手术治疗；磁共振成像；MRI；放射诊断。

引用本文：

Berezovskaya TP, Rubtsova NA, Sinitsyn VE, Zarodnyuk IV, Nudnov NV, Mishchenko AV, Trubacheva YuL, Bergen TA, Grishko PYu, Balyasnikova SS, Dayneko YaA, Ryjkova DV, Hodzhibekova MM, Rucheva NA, Turin IE, Achkasov SI, Nevolskikh AA, Gordeev SS, Droshneva IV. 直肠癌术语：RSR、AOR和RATRO专家工作组达成的一致意见. *Digital Diagnostics*. 2023;4(3):306–321. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD529668>

收到：03.07.2023

接受：10.07.2023

发布日期：04.09.2023

Список сокращений

АОР — Ассоциация онкологов России
МКБ-10 — Международная статистическая классификация болезней и проблем, связанных со здоровьем, Десятого пересмотра
МРТ — магнитно-резонансная томография
РАТРО — Российская ассоциация терапевтических радиационных онкологов
РОРР — Российское общество рентгенологов и радиологов
T2-ВИ — T2-взвешенное изображение (режим получения изображений в магнитно-резонансной томографии)

ЦГР/CRM — циркулярная граница (край) резекции / circumferential resection margin
AJCC-TNM8 (American Joint Committee on Cancer) — общенациональная валидация системы стадирования 8-го Американского объединённого комитета по раку TNM (от tumor, nodus и metastasis) — Международная классификация стадий злокачественных новообразований
TRG (tumor regression grading) — степень регрессии опухоли

ВВЕДЕНИЕ

Единая терминология, применяемая для описания лучевых исследований и формулировки заключений у пациентов с раком прямой кишки, гарантирует адекватное понимание их лечащим врачом и всеми членами мультидисциплинарной медицинской команды. В настоящее время основную роль в стадировании играет магнитно-резонансная томография (МРТ), которую при начальных стадиях рака прямой кишки дополняет трансректальное ультразвуковое исследование. Стадирование предполагает оценку многих анатомических и патоморфологических факторов, влияющих на планирование лечения пациентов с раком прямой кишки. Знание соответствующих терминов и их однозначная трактовка всеми специалистами необходимы для эффективного взаимодействия в интересах пациента и сравнения результатов лечения рака прямой кишки, полученных в разных лечебных учреждениях.

КОНSENSУСНЫЙ МЕТОДИЧЕСКИЙ РЕСУРС ПО ТЕРМИНОЛОГИИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ВИЗУАЛИЗАЦИИ РАКА ПРЯМОЙ КИШКИ

Порядок действий Рабочей группы по созданию отечественных рекомендаций по единой терминологии рака прямой кишки для диагностических целей

Для достижения этой цели была сформирована экспертная группа Российского общества рентгенологов и радиологов (РОРР), представляющая 10 ведущих лечебных учреждений Российской Федерации, оказывающих специализированную помощь пациентам с раком прямой кишки с привлечением экспертов Ассоциации онкологов

России (АОР) и Российской ассоциации терапевтических радиационных онкологов (РАТРО), принимавших участие в подготовке действующих клинических рекомендаций по раку прямой кишки. В состав группы вошло 15 лучевых диагностов, 3 хирурга-онколога и онколог-радиолог.

Тремя членами Рабочей группы из состава авторского коллектива (Березовская Т.П., Мищенко А.В., Гришко П.Ю.) проведён поиск литературы, относящейся к стадированию, оценке распространённости, планированию лечения рака прямой кишки и оценке эффективности неоадьювантной терапии, в базах данных PubMed, Medline и eLIBRARY за период с 2007 по 2023 год, в ходе которого были извлечены основные термины и их трактовки. Список терминов был разослан всем членам Рабочей группы для ознакомления, после чего было проведено два онлайн-обсуждения до достижения консенсуса ($\geq 80\%$) экспертов по трактовке каждого пункта. Термины, по которым не было достигнуто консенсуса (низкий рак прямой кишки, ранний рак прямой кишки, повторный рост опухоли) исключены из текста данной работы. Итоговый вариант рукописи был разослан всем членам Рабочей группы и получил их одобрение.

Согласованный на основе консенсуса экспертов перечень терминов и их разъяснений, касающихся стадирования, оценки распространённости и планирования лечения рака прямой кишки, и рекомендуемый для использования в медицинских диагностических заключениях (преимущественно для МРТ), приведён ниже.

Согласованный на основе консенсуса экспертов перечень терминов и их разъяснения

Термины, касающиеся оценки распространённости и локализации рака прямой кишки

Рак прямой кишки — злокачественная опухоль, развивающаяся из клеток эпителия прямой кишки, обычно

имеющая строение аденокарциномы и локализуемая в пределах 15 см от ануса (код МКБ-10: C20) [1]. Опухоли с нижним полюсом выше этого уровня относят к злокачественным новообразованиям ректосигмоидного соединения (код МКБ-10: C19). Опухоли с гистологическим строением плоскоклеточного рака, локализованные в анальном канале, относят к злокачественным новообразованиям анального канала (код МКБ-10: C21). Важно подчеркнуть, что плоскоклеточный рак анального канала может распространяться выше уровня аноректального перехода и вовлекать ампулу прямой кишки, а рак прямой кишки, имеющий строение аденокарциномы, может распространяться в анальный канал или иметь там преимущественную локализацию. Гистологический тип злокачественных новообразований в таких случаях определяет не только подход к классификации по системе TNM (рак прямой кишки/рак анального канала), но и выбор метода лечения.

Ряд анатомических структур таза, прямой кишки и анального канала имеет важное значение при первичном стадировании рака прямой кишки. Знание этих структур и умение распознавать их при визуализации имеет решающее значение для точной характеристики первичной опухоли [2–5].

Анальный канал хирургический: при трансректальном ультразвуковом исследовании и МРТ нижней границей анального канала считается дистальный край внутреннего сфинктера, верхней границей — при трансректальном ультразвуковом исследовании считается верхний край внутреннего сфинктера, при МРТ — аноректальный переход.

Анальный край — анокутанная линия, место соединения анодермы с перианальной кожей, которому на МРТ в сагиттальной плоскости соответствует дистальный край внутреннего сфинктера анального канала/

межсфинктерная борозда (рис. 1). От этого уровня измеряют расстояние до нижнего края опухоли на сагиттальных Т2-ВИ вдоль центра просвета анального канала и прямой кишки [6].

Аноректальный переход — соединение между анальным каналом и прямой кишкой, которому соответствует верхний край лобково-прямокишечной мышцы, хорошо определяемый на Т2-ВИ в коронарной плоскости, или аноректальный угол, определяемый на Т2-ВИ в сагиттальной плоскости (см. рис. 1). Расстояние от аноректального перехода до нижнего края опухоли важно для планирования хирургического вмешательства и должно быть указано в диагностическом заключении [6].

Зубчатая линия является верхней границей анатомического анального канала, который короче хирургического. Расположение зубчатой линии примерно соответствует середине внутреннего сфинктера. При МРТ она не определяется.

Анальный сфинктерный комплекс включает внутренний и наружный сфинктеры анального канала и лобково-прямокишечную мышцу (см. рис. 1).

Внутренний анальный сфинктер является продолжением внутреннего циркулярного мышечного слоя прямой кишки, состоит из гладкомышечной ткани и при МРТ определяется по значительному утолщению собственного мышечного слоя стенки на уровне анального канала (см. рис. 1). Сигнал от внутреннего сфинктера на Т2-ВИ несколько выше, чем у наружного сфинктера, а при контрастировании он усиливается более интенсивно.

Наружный анальный сфинктер — поперечнополосатая мышца, которая является продолжением лобково-прямокишечной мышцы, разделена на три слоя — подкожный циркулярный; поверхностный эллипсоидный, соединённый с копчиком; глубокий, тесно связанный с лобково-прямокишечной мышцей (см. рис. 1).

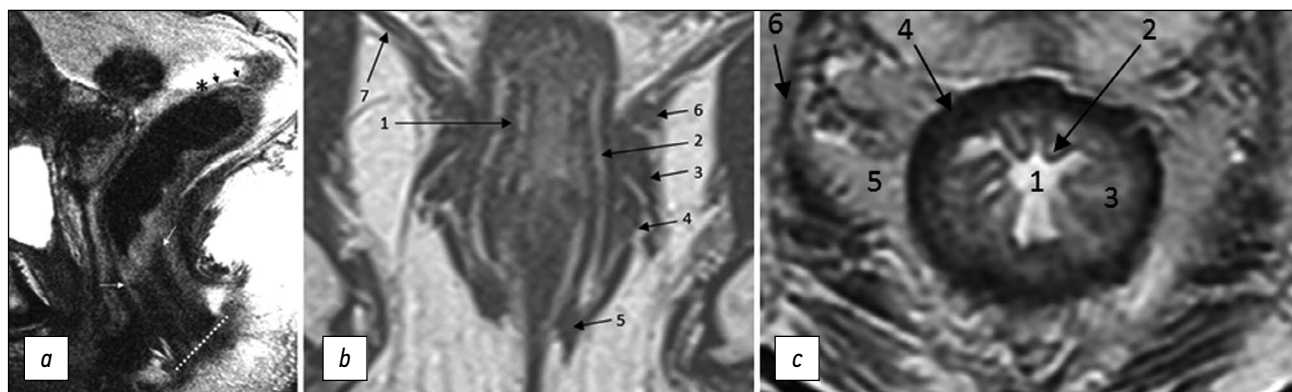


Рис. 1. МРТ-анатомия прямой кишки на Т2-ВИ: *a* — сагиттальная плоскость: анальный край (межсфинктерная борозда; пунктирная линия); аноректальный переход (угол) на уровне верхней границы внутреннего сфинктера анального канала (белые стрелки); переходная складка брюшины в нижней точке прикрепления висцеральной брюшины таза к стенке прямой кишки (звёздочка); перитонизированная часть прямой кишки (чёрные стрелки); *b* — коронарная плоскость: 1 — внутренний сфинктер анального канала; 2 — межсфинктерное пространство; 3 — глубокая порция наружного сфинктера; 4 — поверхностная порция наружного сфинктера; 5 — подкожная порция наружного сфинктера; 6 — лобково-прямокишечная мышца; 7 — мышца, поднимающая задний проход (леватор); *c* — аксиальная плоскость: 1 — просвет кишки; 2 — слизистая оболочка; 3 — подслизистый слой; 4 — мышечный слой; 5 — мезоректальная клетчатка; 6 — мезоректальная фасция.

Межсфинктерное пространство — соединительно-тканно-клетчаточное пространство, разделяющее внутренний и наружный анальные сфинктеры и характеризующееся высоким сигналом на Т2-ВИ (см. рис. 1).

Мезоректальная фасция — тонкий фасциальный футляр, ограничивающий прямую кишку и окружающую её жировую клетчатку. На Т2-ВИ визуализируется в виде гипоинтенсивной циркулярной линии (см. рис. 1). Мезоректальная фасция спереди сливается с фасцией Денонвилле у мужчин или ректовагинальной фасцией (перегородкой) у женщин, сзади — с пресакральной фасцией; полностью окружает прямую кишку только до уровня переходной складки брюшины, выше — её боковые и заднюю части, на уровне верхнеампулярного отдела — только заднюю часть прямой кишки; каудально мезоректальная фасция переходит в межсфинктерное пространство.

Мышечный слой прямой кишки состоит из внутреннего циркулярного и наружного продольного слоёв, которые при МРТ определяются как единый гипоинтенсивный слой на Т2-ВИ, граничащий внутри с гиперинтенсивным подслизистым слоем, а снаружи — с гиперинтенсивной мезоректальной клетчаткой (см. рис. 1).

Мышца, поднимающая задний проход (m. levatorani), — мышечный комплекс (см. рис. 1), состоящий из лобково-прямокишечной (puborectalis), лобково-копчиковой (pubococcygeus), подвздошно-копчиковой (ileococcygeus) мышц и анально-копчиковой фиброзной связки (lig. apococcygeus). Опухоли, инфильтрирующие мышцу, поднимающую задний проход, относятся к категории Т4b.

Переходная складка брюшины формируется в месте перехода брюшины с тазовых органов на стенку прямой кишки с нижней точкой прикрепления по передней стенке кишки и косо идущая вверх по боковым стенкам; она разделяет перитонизированную и неперитонизированную части прямой кишки; на Т2-ВИ определяется в виде гипоинтенсивной линии, которая в аксиальной плоскости имеет V-образную форму, а в сагиттальной плоскости переходит с верхушки семенных пузырьков (у мужчин) или с тела матки (у женщин) (см. рис. 1). Лимфоотток от опухолей, расположенных выше переходной складки брюшины, осуществляется в основном через верхние ректальные и нижние брыжеечные лимфатические узлы; опухоли ниже переходной складки брюшины могут дренироваться через внутренние подвздошные и запирательные лимфатические узлы. Рекомендуется при описании МРТ указывать положение опухоли по отношению к переходной складке брюшины (целиком ниже/пересекает/целиком выше) [6].

Пресакральное пространство — клетчаточное пространство, отграниченное спереди пресакральной фасцией (задней частью париетального листа фасции таза); содержит пресакральные вены и сплетения.

Слизистая оболочка прямой кишки — самый внутренний, тонкий слой стенки прямой кишки,

при визуализации имеет гипоинтенсивный сигнал на Т2-ВИ за счёт собственной мышечной пластинки (см. рис. 1).

Термины, касающиеся первичного стадирования рака прямой кишки

Для первичного стадирования рака прямой кишки предпочтительным методом диагностики считается МРТ, для начальных стадий рака прямой кишки рекомендуется трансректальное ультразвуковое исследование [1, 3, 7–9]. В настоящее время определение стадии проводится по классификации TNM Международного союза борьбы с раком (Union for International Cancer Control, UICC; 8-е изд., 2017) [10].

Ниже приведён ряд терминов, которые наряду с категорией «Т» имеют важное значение для характеристики первичной опухоли [2, 4, 5].

Глубина экстрамуральной инвазии — максимальное расстояние от внешнего края мышечного слоя стенки в основании экстрамурального компонента первичной опухоли до его внешнего края на Т2-ВИ высокого разрешения, ориентированных перпендикулярно стенке кишки на уровне опухоли (рис. 2). Глубину экстрамуральной инвазии используют для определения подстадии опухолей Т3.

Категория «Т» по системе TNM. Категория «Т», установленная по результатам обследования первичного пациента с раком прямой кишки, называется клинической и обозначается префиксом «с» (сТ); если для стадирования применяли лучевые методы обследования, то используют префикс «i» (iT).

Т1 — опухоль распространяется на подслизистый слой. Подклассификация опухолей Т1 по Kikuchi [11]: Т1sm1 — глубина инвазии подслизистого слоя до 1/3; Т1sm2 — глубина инвазии подслизистого слоя до 2/3; Т1sm3 — полная инвазия опухолью всего подслизистого слоя. Для оценки опухолей Т1 предпочтительнее использовать трансректальное ультразвуковое исследование.

Т2 — опухоль распространяется в мышечный слой. Трансректальное ультразвуковое исследование считается более точным в диагностике опухолей Т1/Т2 (чувствительность 94%, специфичность 86%) по сравнению с МРТ (чувствительность 94%, специфичность 70%), но менее точным при определении статуса лимфатических узлов [12].

Т3 — опухоль распространяется за пределы собственной мышечной оболочки, врастая в субсерозную или неперитонизированную окологиечную клетчатку (опухоли Т3 подразделяются на следующие подстадии: Т3а <1 мм; Т3b 1–5 мм; Т3с 5–15 мм; Т3d >15 мм); для оценки экстрамурального распространения опухоли предпочтительно использовать Т2-ВИ высокого разрешения, перпендикулярные стенке кишки на уровне опухоли.

Т4 — опухоль прорастает серозную оболочку/брюшину таза (Т4а) или окружающие органы и ткани (Т4b), включая органы малого таза (матку, яичники, влагалище, предстательную железу, семенные пузырьки, мочевой

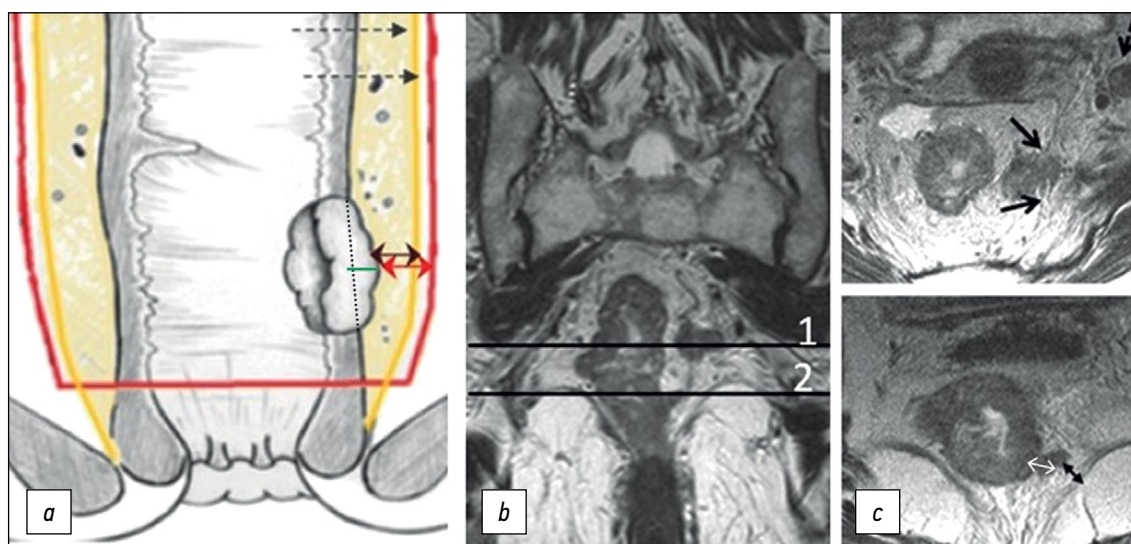


Рис. 2. Циркулярная граница (край) резекции прямой кишки при тотальной мезоректумэктомии: *а* (схема) — экстрамуральное распространение опухоли (зелёная линия); мезоректальная фасция (жёлтая линия); циркулярная граница (край) резекции (красная линия); расстояние от опухоли до мезоректальной фасции (двойная чёрная стрелка); расстояние от опухоли до циркулярной границы (края) резекции (двойная красная стрелка); *б* — Т2-ВИ в коронарной плоскости опухоли нижнеампулярного отдела прямой кишки с экстрамуральной сосудистой инвазией и депозитом с уровнями аксиальных Т2-ВИ; *с* — верхний аксиальный срез соответствует уровню депозита, вовлекающего мезоректальную фасцию (чёрные стрелки), экстрамезоректальный лимфоузел (пунктирная стрелка); нижний аксиальный срез соответствует уровню экстрамуральной сосудистой инвазии (глубина экстрамуральной инвазии — двойная белая стрелка); расстояние от опухоли до мышцы, поднимающей задний проход (двойная чёрная стрелка).

пузырь, мочеточники, уретру, кости), скелетные мышцы (запирательную, грушевидную, поднимающую задний проход, седалищно-копчиковую, лобково-прямокишечную, наружный анальный сфинктер), седалищный или крестцовый нервы, крестцово-оститные / крестцово-бугорные связки, любой экстрамезоректальный сосуд, любую петлю толстой или тонкой кишки вне первичного очага, экстрамезоректальную клетчатку [13].

Стадирование рака прямой кишки, распространяющегося в анальный канал, требует детальной оценки анального канала и сфинктерного комплекса с использованием Т2-ВИ высокого разрешения в коронарной плоскости параллельно анальному каналу. Категорию «сТ» рекомендуется определять в первую очередь на основании распространения опухоли на уровне прямой кишки. Поражение наружного сфинктера, лобково-прямокишечной мышцы и мышцы, поднимающей задний проход, следует классифицировать как сТ4b. Распространение на анальный канал должно быть описано отдельно с подробным указанием поражённых структур (внутренний сфинктер, межсфинктерное пространство и/или тазовое дно), а в заключении дополнительно указано: анальный канал (+) / анальный канал (-) [13]. Следует отметить, что при опухолях, распространяющихся в анальный канал ниже зубчатой линии, паховые лимфоузлы могут считаться регионарными (как указано в AJCC-TNM8).

Местнораспространённый рак прямой кишки — первичная опухоль, которая выходит за пределы мышечного слоя (Т3/Т4) и/или сопровождается поражением

регионарных лимфатических узлов (N1/2), но не имеет признаков отдалённых метастазов (M0).

Циркулярная граница (край) резекции (circumferential resection margin, CRM) — хирургический и патоморфологический термин, определяемый как поверхность хирургического иссечения неперитонизированной части прямой кишки, которая при выполнении тотальной мезоректумэктомии должна проходить вдоль мезоректальной фасции.

Статус циркулярной границы (края) резекции/CRM определяют при гистологическом исследовании операционного препарата удалённой прямой кишки; его можно прогнозировать на основе МРТ по кратчайшему расстоянию между экстрамуральным компонентом опухоли / депозитом / поражённым лимфоузлом и мезоректальной фасцией. Вовлечение циркулярной границы (края) резекции (ЦГР), ЦГР(+) прогнозируется, если это расстояние составляет 1 мм или менее. При низко расположенном раке прямой кишки кратчайшее расстояние определяется до мышцы, поднимающей задний проход. Расстояние от увеличенных лимфатических узлов без признаков экстракапсулярного распространения (с ровными контурами) не учитывается и должно расцениваться как ЦГР(-) [13].

Экстрамуральная сосудистая/венозная инвазия (extramural venous invasion) при гистологическом исследовании представляет собой внутрисосудистое распространение опухоли за пределы стенки прямой кишки; является предиктором неблагоприятного прогноза, лимфогенных и отдалённых метастазов, рецидива опухоли [14–17]. На Т2-ВИ экстрамуральная сосудистая/венозная инвазия определяется как распространение опухолевого

сигнала в сосудистые структуры мезоректальной клетчатки [6, 18, 19], что может сочетаться с увеличением диаметра поражённого сосуда либо с выходом опухоли за пределы его стенок с формированием узла, бусоили червеобразной структуры. Оценка экстрамуральной венозной инвазии в сосудах диаметром менее 3 мм при МРТ недостоверна. При определении категории «Т» (опухоли Т3 и Т4) в случаях слияния первичной опухоли и узла экстрамуральной венозной инвазии учитывают их общий размер.

Прилегание опухоли — вариант изображения, когда отчётливо проследить жировую клетчатку между опухолью и соседним органом не удаётся, однако в структуре прилежащего соседнего органа отсутствует МР-сигнал от опухолевой ткани. Такой вариант рекомендуется расценивать как «возможную инвазию» [20], которая, согласно рекомендациям AJCC-TNM8, должна классифицироваться как «mT4b» с последующим уточнением стадии после операции. Если при микроскопическом исследовании не выявляются элементы опухоли в месте адгезии, то такой случай классифицируют как «pT1–3» в зависимости от глубины инвазии.

Термины, касающиеся описания рака прямой кишки

Описание внешнего вида опухоли не влияет на определение стадии, однако имеет важное значение для характеристики опухоли. Приводим термины, используемые при описании опухоли.

Десмопластическая реакция — фиброзная реакция стромы опухоли, возникающая на границе с нормальной тканью в виде спикул соединительной ткани, не содержащих опухолевых клеток. Может наблюдаться как в первичной опухоли, затрудняя при МРТ дифференциацию опухолей Т2 и Т3а–б, так и после неоадьювантного химиолучевого лечения.

Муцинозный рак — прогностически неблагоприятный гистологический вариант рака прямой кишки, при котором содержание внеклеточного муцина в опухоли составляет более 50% объёма опухоли. При МРТ скопления муцина имеют гиперинтенсивный сигнал на Т2-ВИ (рис. 3).

Опухолевая площадка обычно представлена изъязвлением/эрозией в центре опухоли, где определяется максимальная глубина опухолевой инвазии.

Полиповидная опухоль — опухоль с экзофитным типом роста (см. рис. 3); может иметь ножку, в которой иногда хорошо видны питающие сосуды; локализация такой опухоли может быть указана с использованием условного циферблата (12 часов — центр передней стенки, 6 часов — центр задней стенки, 3 часа — центр левой стенки, 9 часов — центр правой стенки).

Полуциркулярная опухоль занимает лишь часть окружности прямой кишки.

Циркулярная/субциркулярная опухоль распространяется по всей или почти всей окружности просвета прямой кишки (см. рис. 3).

Термины, касающиеся локализации, стадирования и критериев поражения лимфатических узлов при раке прямой кишки

Оценка состояния лимфатических узлов является важным аспектом стадирования рака прямой кишки, хотя она менее точна, чем для категории «Т» [21]. По результатам метаанализа [22], чувствительность и специфичность МРТ в оценке поражения лимфатических узлов составляют 73% (95% ДИ 68–77) и 74% (95% ДИ 68–80) соответственно. Сопоставимую с МРТ диагностическую эффективность показали компьютерная томография и трансректальное ультразвуковое исследование [23].

Важно помнить, что не все лимфатические узлы, расположенные в области таза, являются регионарными для рака прямой кишки и относятся к категории «N». Оценивая тазовые лимфатические узлы как регионарные, важно учитывать их локализацию (рис. 4) и по возможности указывать при описании исследования. Ниже приведены термины, относящиеся к локализации, стадированию и критериям поражения лимфатических узлов.

Категория «N» по системе TNM: N0 — отсутствие аномальных локорегионарных лимфатических узлов; N1 — от 1 до 3 аномальных регионарных лимфатических узлов (N1a — 1 лимфатический узел; N1b — 2–3

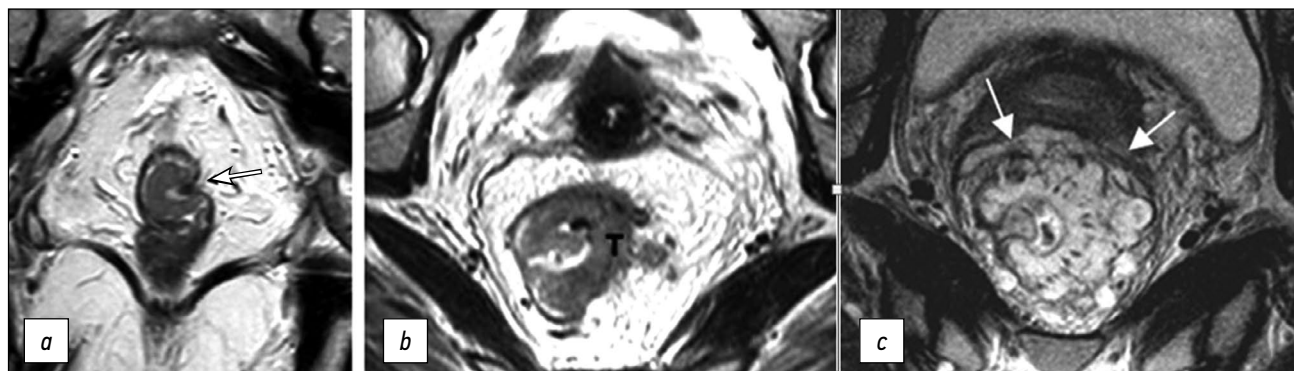


Рис. 3. Варианты изображения опухоли на Т2-ВИ: а — полиповидная/экзофитная опухоль (стрелка); б — полуциркулярная опухоль (Т), экстрамуральная сосудистая инвазия; с — муцинозная опухоль (стрелки).

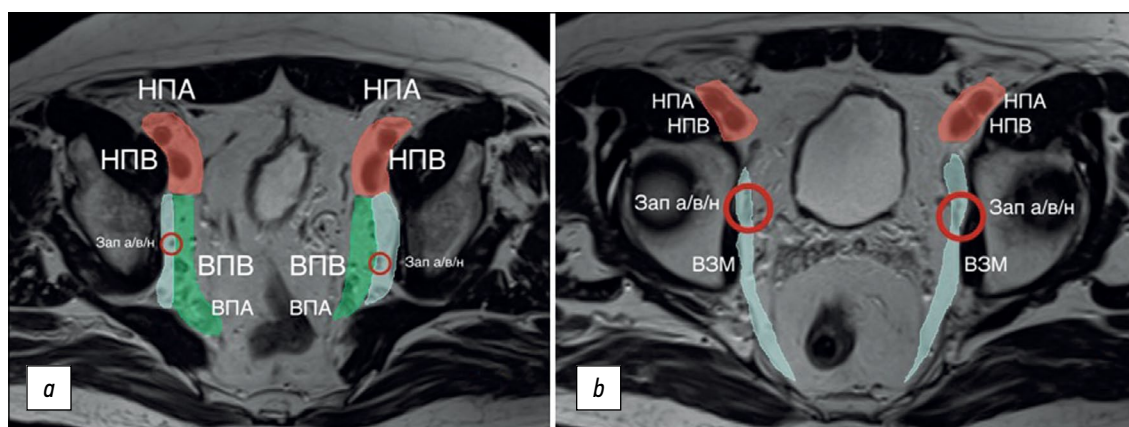


Рис. 4. Схема локализации латеральных тазовых лимфатических узлов (обозначены цветом): наружные подвздошные лимфатические узлы — красным, запирающие лимфатические узлы — голубым, внутренние подвздошные лимфатические узлы — зелёным. Уровни: *a* — проксимальный; *b* — дистальный. НПА — наружная подвздошная артерия; НПВ — наружная подвздошная вена; ВПВ — внутренняя подвздошная вена; ВПА — внутренняя подвздошная артерия; Зап а/в/н — запирающие артерия/вена/нерв; ВЗМ — внутренняя запирающая мышца.

лимфатических узла; N1с — опухолевый депозит); N2 — более 3 аномальных регионарных лимфатических узлов (N2a — от 4 до 6 лимфатических узлов; N2b — 7 или более лимфатических узлов). При описании допустимо использовать «N(+)» при наличии аномальных регионарных лимфатических узлов независимо от их количества и «N(-)» при отсутствии аномальных регионарных лимфатических узлов.

Регионарные лимфатические узлы (N). Согласно последней классификации AJCC-TNM8, регионарные лимфатические узлы включают мезоректальные/параректальные, верхние ректальные, нижние брыжеечные, внутренние подвздошные лимфатические узлы без упоминания запирающих лимфатических узлов, однако запирающие лимфатические узлы обычно относят к регионарным лимфатическим узлам [21]. Все остальные лимфатические узлы таза, включая паховые, наружные подвздошные, общие подвздошные и парааортальные лимфатические узлы, при раке прямой кишки не являются регионарными и должны расцениваться как отдалённые метастазы (M).

Мезоректальные лимфатические узлы расположены в мезоректуме и являются регионарными.

Нижние брыжеечные и верхние прямокишечные лимфатические узлы относят к регионарным и удаляют их во время тотальной мезоректумэктомии. Рекомендуется отметить наиболее подозрительный верхний лимфатический узел этих цепочек, так как он может изменить место лигирования сосудов во время тотальной мезоректумэктомии.

Морфологические критерии поражения мезоректальных, верхних прямокишечных и нижних брыжеечных лимфатических узлов включают (а) неровные контуры; (б) неоднородную структуру; (в) округлую форму. Подозрительными считаются лимфатические узлы (а) размером <5 мм при наличии 3 морфологических критериев; (б) размером от 5 до 9 мм при наличии 2 критериев; (в)

размером >9 мм — всегда. После неoadъювантной химиолучевой терапии подозрительными следует считать все лимфатические узлы размером более 5 мм [8].

Депозит патоморфологически определяется как отдельный опухолевый узел в мезоректальной клетчатке без признаков идентифицируемой ткани лимфатических узлов или сосудистых/нервных структур и обозначается как «N1с» без учёта количества депозитов. Количество опухолевых депозитов не добавляется к количеству положительных лимфатических узлов [24]. На сегодняшний день нет достаточных доказательств относительно того, можно ли при МРТ достоверно различать лимфатические узлы и опухолевые депозиты [13]. Происхождение депозитов может быть обусловлено прерывистым распространением опухоли, распространением по лимфатическим сосудам, венозной или периневральной инвазией или полным замещением лимфатического узла [25]. При МРТ дифференциация между положительными лимфатическими узлами с экстракапсулярным распространением, экстранодальными опухолевыми депозитами и прерывистой экстрамуральной сосудистой инвазией может быть затруднена. Имеющиеся данные свидетельствуют о том, что все эти состояния имеют худший прогноз по сравнению с поражением лимфатических узлов [26]. Опухолевые депозиты в мезоректуме или по ходу крупных прямокишечных сосудов, сочетающиеся с признаками экстрамуральной сосудистой/венозной инвазии, расцениваются как «N1с», ЭМСИ/ЭМВИ(+). Депозиты без признаков экстрамуральной сосудистой/венозной инвазии расцениваются как «N1с», ЭМСИ/ЭМВИ(-).

Латеральные тазовые лимфатические узлы (лимфатические узлы у боковых стенок таза) представляют собой лимфатические узлы, расположенные снаружи от мезоректальной фасции, включая наружные, внутренние подвздошные и запирающие лимфатические узлы. При описании, когда это возможно, лучше указывать более конкретную локализацию. При первичном

стадировании рекомендуется считать подозрительными регионарные латеральные тазовые лимфатические узлы (внутренние подвздошные и запирательные) с короткой осью (7 мм и более) [12, 27]. Морфологические критерии к латеральным тазовым лимфатическим узлам применять не рекомендуется [13].

Внутренние подвздошные лимфатические узлы являются регионарными и при раке прямой кишки входят в объём диссекции латеральных лимфатических узлов таза. Они располагаются по ходу внутренних подвздошных сосудов. На уровне запирательной мышцы они локализируются медиальнее внутренней подвздошной артерии; лимфатические узлы, определяющиеся латеральнее внутренней подвздошной артерии, считаются запирательными лимфатическими узлами (см. рис. 4).

Запирательные лимфатические узлы относятся к регионарным: они расположены между наружной и внутренней подвздошными артериями, медиальнее внутренней запирательной мышцы и латеральнее внутренней подвздошной артерии (см. рис. 4).

Наружные подвздошные лимфатические узлы не относятся к регионарным: они располагаются вдоль наружных подвздошных сосудов (см. рис. 4) и подразделяются на латеральные, средние/срединные и медиальные цепочки. Латеральная подгруппа, соответственно названию, расположена латерально от наружной подвздошной артерии, средняя/срединная группа — между артерией и веной, а медиальная — кзади от наружной подвздошной вены. Лимфатические узлы медиальной подгруппы находятся в непосредственной близости от запирательных сосудов и одноимённых лимфатических узлов и могут быть источником диагностических трудностей, так как они часто неотличимы от последних, локализуясь по ходу запирательной артерии в месте её отхождения от внутренней подвздошной (гипогастральной) артерии на уровне внутренней obturatorной мышцы [3]. Поражение наружных подвздошных лимфатических узлов при раке прямой кишки встречается крайне редко. Нерегионарные лимфатические узлы считаются подозрительными, если они имеют размер более 10 мм по короткой оси.

Паховые лимфатические узлы не являются регионарными при раке прямой кишки, но относятся к регионарным при плоскоклеточном раке анального канала: они располагаются в паховой области ниже паховой связки. Могут быть отнесены к регионарным при опухолях, распространяющихся ниже зубчатой линии [13]. Подразделяются на поверхностные (кпереди от подкожной вены и поверхностных бедренных сосудов) и глубокие (медиальнее бедренных сосудов).

Термины, рекомендуемые для описания ответа на неоадъювантную химиолучевую терапию

В настоящее время для лечения больных раком прямой кишки широко применяется комбинированный метод

с неоадъювантной химиолучевой терапией, результаты которой влияют на планирование дальнейшего лечения. В настоящее время МРТ считается оптимальным методом визуализации для оценки эффективности неоадъювантной химиолучевой терапии. Ниже приведены термины, рекомендуемые для описания ответа на неоадъювантную химиолучевую терапию.

Полный патоморфологический ответ (pathologic complete response, pCR) — ответ на неоадъювантную химиолучевую терапию, характеризующийся полным отсутствием жизнеспособных опухолевых клеток при патоморфологическом исследовании операционного препарата.

Полный клинический ответ (clinical complete response, cCR) — ответ на неоадъювантную химиолучевую терапию, характеризующийся отсутствием клинически обнаруживаемой опухоли при пальцевом ректальном исследовании, МРТ и эндоскопии; используется в качестве суррогата для патоморфологического полного ответа (pCR). При МРТ он представляет собой либо тонкий фиброз стенки прямой кишки в ложе опухоли без остаточных участков опухолевого сигнала, либо восстановление нормальной стенки прямой кишки без каких-либо признаков опухоли [28].

Почти полный ответ — понятие было введено в связи с тем, что у части пациентов с хорошим, но неполным ответом при первичном контрольном исследовании при повторной оценке с более длительным интервалом после неоадъювантной химиолучевой терапии он может перейти в категорию cCR.

Снижение стадии (downstaging) — термин, описывающий снижение категории «Т» или «N» после неоадъювантной химиолучевой терапии; категория после лечения обозначается префиксом «у», например, уT0 — видимая первичная опухоль отсутствует.

Уменьшение размеров (downsizing) — термин, описывающий уменьшение размеров опухоли или её регионарных метастазов после неоадъювантной терапии без изменения категорий «Т» или «N».

Степень регрессии опухоли (tumor regression grading, TRG) — система оценки ответа на неоадъювантную химиолучевую терапию, представляющая собой модификацию патоморфологической классификации Мандарда (MRI tumour regression grading); основана на качественной оценке соотношения низкого МР-сигнала от фиброзной ткани и сигнала средней интенсивности от резидуальной опухоли на T2-ВИ: mrTRG1 (полный ответ) — нет макроскопических признаков остаточной опухолевой ткани / визуализируется минимальный участок фиброза (тонкий рубец); mrTRG2 (выраженный/почти полный ответ) — плотный фиброзный рубец, признаки опухолевой ткани не определяются (по данным патоморфологии, клетки опухоли отсутствуют/единичные на фоне плотного фиброза); mrTRG3 (умеренный ответ) — фиброз преобладает (>50%), при этом визуализируется МР-сигнал средней интенсивности,

характерный для опухолевой ткани; mrTRG4 (минимальный ответ) — МР-сигнал от опухолевой ткани преобладает в сочетании с небольшим/минимальным количеством фиброза в структуре; mrTRG5 (отсутствие ответа/прогрессирование) — только МР-сигнал средней интенсивности, характерный для опухолевой ткани, без признаков фиброза (рис. 5). Имеющийся опыт клинического применения показывает, что эта система имеет плохую

корреляцию с патоморфологической TRG, ограниченное положительное предсказательное значение pCR и посредственную воспроизводимость с низкими значениями каппа [29, 30], что создаёт предпосылки для дальнейшего поиска способов повышения её диагностической эффективности.

Рубец в ложе облучённой опухоли характеризуется гипоинтенсивным сигналом на T2-ВИ без признаков

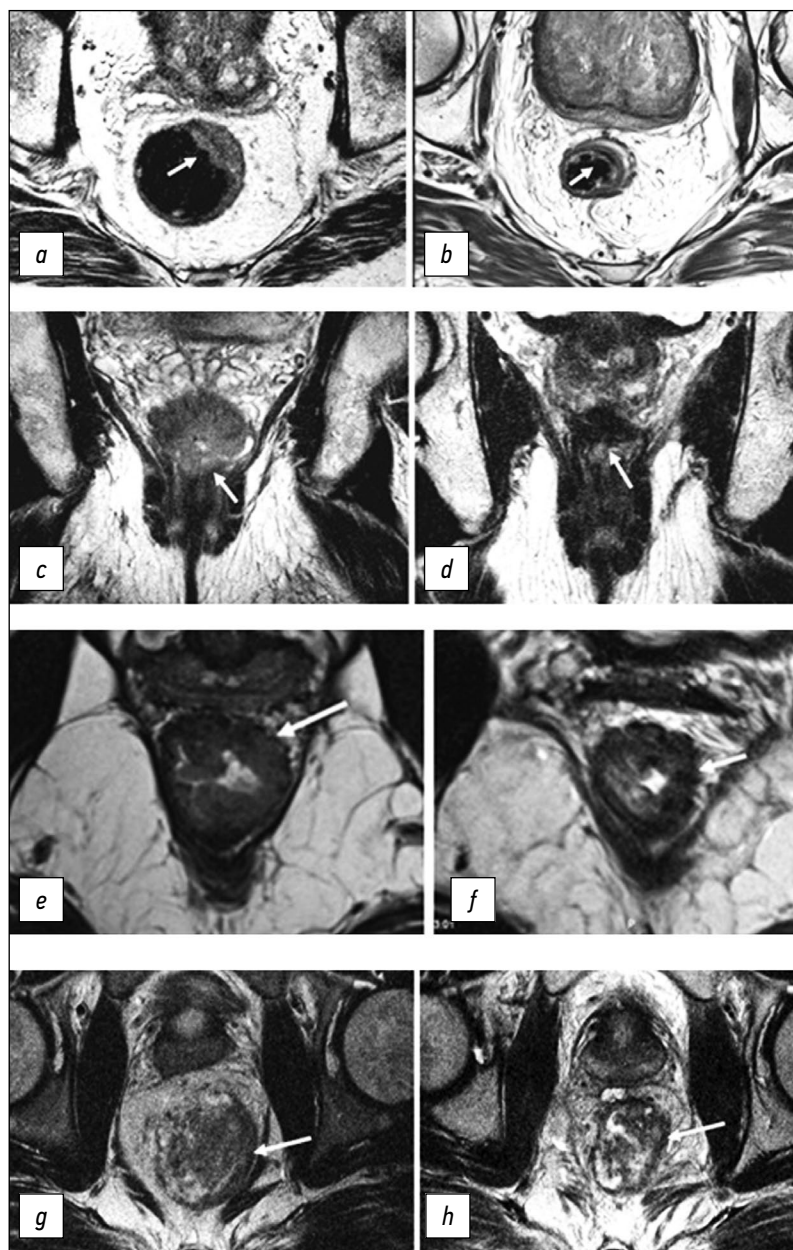


Рис. 5. Оценка степени регрессии опухоли на T2-ВИ высокого разрешения по шкале TRG:

TRG1: *a* — опухоль на 12–2 часах условного циферблата до неоадьювантной химиолучевой терапии (стрелка); *b* — после лечения опухоль замещена линейным участком фиброза в подслизистом слое;

TRG2: *c* — опухоль нижеампулярного отдела прямой кишки до химиолучевой терапии (стрелка); *d* — после лечения опухоль определяется в виде участка толстого фиброза (стрелка) без макроскопических МР-признаков опухолевой ткани;

TRG3: *e* — полуциркулярная опухоль нижеампулярного отдела прямой кишки до химиолучевой терапии (стрелка); *f* — после лечения в опухоли смешанный МР-сигнал с преобладанием сигнала низкой интенсивности, характерного для фиброза, и сохранением макроскопических участков опухолевого МР-сигнала средней интенсивности (стрелка);

TRG4: *g* — опухоль до химиолучевой терапии (стрелка); *h* — после лечения (стрелка) признаков ответа на лечение нет, сохраняется МР-сигнал опухолевой ткани.

ограничения диффузии на диффузионно-взвешенном изображении.

Отёк подслизистого слоя определяется после неоадьювантной химиолучевой терапии как область высокой интенсивности сигнала на T2-ВИ в стенке прямой кишки, прилегающей к пролеченной опухоли, и его не следует ошибочно интерпретировать как опухоль.

Муцинозная/коллоидная дегенерация (муцинозный ответ) характеризуется высоким сигналом на T2-ВИ от скоплений бесклеточного муцина, в которых отсутствуют жизнеспособные опухолевые клетки; может наблюдаться в немучинозной опухоли после неоадьювантной химиолучевой терапии. В случае муцинозной опухоли муцин, сохраняющийся после лечения, также может не содержать злокачественных клеток, однако при МРТ сложно отличить бесклеточный муцин от клеточного.

Термины, характеризующие варианты лечения рака прямой кишки

Основным методом лечения рака прямой кишки является хирургический. При местнораспространённом процессе его применяют после неоадьювантного лечения. Термины, характеризующие варианты лечения рака прямой кишки приведены ниже.

Тотальная мезоректумэктомия включает иссечение прямой кишки вдоль мезоректальной фасции единым блоком с мезоректальной жировой клетчаткой, сосудами и лимфатическими узлами. Считается стандартом для радикального лечения рака прямой кишки [31].

Парциальная мезоректумэктомия подразумевает частичное удаление мезоректальной клетчатки с последующим её пересечением и сохранением части мезоректальной клетчатки анастомозируемого участка прямой кишки.

Передняя резекция / низкая передняя резекция — наиболее распространённый вид операции при раке прямой кишки, сопровождающийся выполнением тотальной или парциальной мезоректумэктомии и формированием колоректального анастомоза.

Интерсфинктерная резекция — сфинктерсохраняющая операция при низком раке прямой кишки, при которой удаляется только часть внутреннего анального сфинктера, а наружный анальный сфинктер сохраняется с последующим наложением колоанального анастомоза. Может применяться в отдельных случаях, когда межсфинктерное пространство не инфильтрировано опухолью.

Брюшно-промежностная экстирпация включает резекцию всего сфинктерного комплекса с формированием постоянной колостомы.

Брюшно-анальная резекция прямой кишки — операция, подразумевающая выполнение тотальной мезоректумэктомии, но сопровождающаяся формированием колоанального анастомоза.

Экстралеваторная брюшно-промежностная экстирпация — вариант стандартной брюшно-промежностной экстирпации с более широким иссечением сфинктерного комплекса и мышцы, поднимающей задний проход.

Экзентерация малого таза включает радикальную резекцию единым блоком всех поражённых опухолью тазовых органов, часто с последующей висцеральной реконструкцией, включающей восстановление пассажа кишечного содержимого и реализацию одного из методов деривации мочи [32]. Пятилетняя общая выживаемость после экзентерации малого таза по поводу первичного местнораспространённого рака прямой кишки составляет 30–55%, по поводу рецидивных опухолей — в среднем не превышает 20–25% [33].

Трансанальное иссечение — локальное иссечение опухоли на всю толщину до мезоректальной клетчатки. Лимфатические узлы не удаляются.

Трансанальная эндоскопическая микрохирургия — иссечение опухоли на всю толщину до мезоректальной клетчатки с использованием видеоэндоскопических технологий. Эта методика обеспечивает более высокую степень обзора стенки прямой кишки и возможность её полнослойного иссечения с последующим ушиванием дефекта.

Операции R0/R1/R2 в соответствии с принятыми критериями радикальности операций: R0 — радикальное удаление опухоли без микроскопической и макроскопической остаточной опухоли; R1 — краевая резекция, микроскопическая остаточная опухоль; R2 — неполное удаление опухоли, макроскопическая остаточная опухоль. Процедура определения остаточной опухоли происходит после субъективной оценки хирурга и объективного морфологического исследования.

Предоперационная лучевая терапия проводится в виде пролонгированного курса (5–6 недель) в сочетании с радиосенсибилизирующей химиотерапией или в виде концентрированного курса (1 неделя) без сопутствующей химиотерапии.

Неоадьювантная химиолучевая терапия — комбинация химиотерапии и лучевой терапии, которую проводят перед хирургическим этапом лечения. Химиотерапия здесь считается радиосенсибилизирующей, а не «системной» (для лечения отдалённых метастазов).

Неоадьювантная химиотерапия — вид химиотерапии, проводимый непосредственно перед хирургическим удалением первичной опухоли для улучшения результатов операции/лучевой терапии и предотвращения образования метастазов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе консенсуса экспертов подготовлен словарь терминов, предоставляющий лучевым диагностам методический ресурс по терминологии для описания и интерпретации результатов визуализации рака прямой кишки.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рак прямой кишки. Клинические рекомендации. Одобрены на заседании научно-практического совета Министерства здравоохранения Российской Федерации. Москва, 2022. Режим доступа: https://cr.minzdrav.gov.ru/recomend/554_3. Дата обращения: 15.08.2023.
2. Bogveradze N., Snaebjornsson P., Grotenhuis B.A., et al. MRI anatomy of the rectum: Key concepts important for rectal cancer staging and treatment planning // *Insights Imaging*. 2023. Vol. 14, N 1. P. 13. doi: 10.1186/s13244-022-01348-8
3. Gollub M.J., Arya S., Beets-Tan R.G., et al. Use of magnetic resonance imaging in rectal cancer patients: Society of Abdominal Radiology (SAR) rectal cancer disease-focused panel (DFP) recommendations 2017 // *AbdomRadiol*. 2018. Vol. 43, N 11. P. 2893–2902. doi: 10.1007/s00261-018-1642-9
4. Nougaret S., Rousset P., Gormly K., et al. Structured and shared MRI staging lexicon and report of rectal cancer: A consensus proposal by the French Radiology Group (GRERCAR) and Surgical Group (GRECCAR) for rectal cancer // *DiagnInterv Imaging*. 2022. Vol. 103, N 3. P. 127–141. doi: 10.1016/j.diii.2021.08.003
5. Гришко П.Ю., Балясникова С.С., Самсонов Д.В., и др. Современный взгляд на принципы диагностики и лечения рака прямой кишки по данным МРТ (обзор литературы) // *Медицинская визуализация*. 2019. Т. 23, № 2. С. 7–26. doi: 10.24835/1607-0763-2019-2-7-26
6. Fernandes M.C., Gollub M.J., Brown G. The importance of MRI for rectal cancer evaluation // *Surg Oncol*. 2022. N 43. P. 101739. doi: 10.1016/j.suronc.2022.101739
7. Glynne-Jones R., Wyrwicz L., Tiret E., et al. Rectal cancer: ESMO clinical practice guidelines for diagnosis, treatment and follow-up // *Ann Oncol*. 2017. Vol. 28, Suppl. 4. P. 22–40. doi: 10.1093/annonc/mdx224
8. Beets-Tan R., Lambregts D., Maas M., et al. Magnetic resonance imaging for clinical management of rectal cancer: Updated recommendations from the 2016 European Society of Gastrointestinal and Abdominal Radiology (ESGAR) consensus meeting // *EurRadiol*. 2018. Vol. 28, N 4. P. 1465–1475. doi: 10.1007/s00330-017-5026-2
9. Oien K., Forsmo H.M., Rösler C., et al. Endorectal ultrasound and magnetic resonance imaging for staging of early rectal cancers: how well does it work in practice? // *Acta Oncol*. 2019. Vol. 58, Supl. P. 49–54. doi: 10.1080/0284186X.2019.1569259
10. Brierley J.D., Gospodarowicz M. K., Wittekind C. TNM Classification of Malignant Tumours. 8th ed. Wiley-Blackwell, 2017. 272 p.

ADDITIONAL INFORMATION

Funding source. This article was not supported by any external sources of funding.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work

11. Kikuchi R., Takano M., Takagi K., et al. Management of early invasive colorectal cancer. Risk of recurrence and clinical guidelines // *Dis Colon Rectum*. 1995. Vol. 38, N 12. P. 1286–1295. doi: 10.1007/BF02049154
12. Boot J., Gomez-Munoz F., Beets-Tan R. Imaging of rectal cancer // *Radiologe*. 2019. Vol. 59, Suppl. 1. P. 46–50. doi: 10.1007/s00117-019-0579-5
13. Lambregts D., Bogveradze N., Blomqvist L., et al. Current controversies in TNM for the radiological staging of rectal cancer and how to deal with them: Results of a global online survey and multidisciplinary expert consensus // *EurRadiol*. 2022. Vol. 32, N 7. P. 4991–5003. doi: 10.1007/s00330-022-08591-z
14. Майновская О.А., Рыбаков Е.Г., Чернышов С.В., и др. Новые морфологические факторы риска метастазирования в регионарные лимфоузлы при раке прямой кишки с инвазией в подслизистую основу // *Колопроктология*. 2021. Т. 20, № 4. С. 22–33. doi: 10.33878/2073-7556-2021-20-4-22-33
15. Волкова С.Н., Сташук Г.А., Черменский Г.В., Наумов Е.К. Роль МРТ в выявлении экстрамуральной сосудистой инвазии как индикатора наличия регионарных и отдаленных метастазов рака нижнеампулярного отдела прямой кишки // *Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология*. 2019. Т. 164, № 4. С. 66–71. doi: 10.31146/1682-8658-ecg-164-4-66-71
16. Lord A.C., D'Souza N., Shaw A., et al. MRI-diagnosed tumor deposits and EMVI status have superior prognostic accuracy to current clinical TNM staging in rectal cancer // *Ann Surg*. 2022. Vol. 276, N 2. P. 334–344. doi: 10.1097/SLA.0000000000004499
17. Rokan Z., Simillis C., Kontovounisios C., et al. Locally recurrent rectal cancer according to a standardized MRI classification system: A systematic review of the literature // *J Clin Med*. 2022. Vol. 11, N 12. P. 3511. doi: 10.3390/jcm11123511
18. Гришко П.Ю., Мищенко А.В., Ивко О.В., и др. Возможности мультипараметрической магнитно-резонансной томографии в оценке эффективности неoadьювантного лечения рака прямой кишки // *Лучевая диагностика и терапия*. 2019. Т. 10, № 4. С. 49–56.
19. Inoue A., Sheedy S.P., Heiken J.P., et al. MRI-detected extramural venous invasion of rectal cancer: Multimodality performance and implications at baseline imaging and after neoadjuvant therapy // *Insights Imaging*. 2021. N 12. P. 110. doi: 10.1186/s13244-021-01023-4
20. Al-Sukhni E., Milot L., Fruitman M., et al. Diagnostic Accuracy of MRI for assessment of T category, lymph node metastases, and circumferential

resection margin involvement in patients with rectal cancer: A systematic review and meta-analysis // *Annals Surgical Oncology*. 2012. Vol. 19, N 7. P. 2212–2222. doi: 10.1245/s10434-011-2210-5

21. Borgheresi A., De Muzio F., Agostini A., et al. Lymph nodes evaluation in rectal cancer: Where do we stand and future perspective // *J Clin Med*. 2022. Vol. 11, N 9. P. 2599. doi: 10.3390/jcm11092599

22. Zhuang Z., Zhang Y., Wei M., et al. Magnetic resonance imaging evaluation of the accuracy of various lymph node staging criteria in rectal cancer: A systematic review and meta-analysis // *Front Oncol*. 2021. N 11. P. 709070. doi: 10.3389/fonc.2021.709070

23. Li X., Sun Y., Tang L., et al. Evaluating local lymph node metastasis with magnetic resonance imaging, endoluminal ultrasound and computed tomography in rectal cancer: A meta-analysis // *Color Dis*. 2015. Vol. 17, N 6. P. 129–135. doi: 10.1111/codi.12909

24. Weiser M.R. AJCC 8th edition: Colorectal cancer // *Ann Surg Oncol*. 2018. Vol. 25, N 6. P. 1454–1455. doi: 10.1245/s10434-018-6462-1

25. Ueno H., Nagtegaal I.D., Quirke P., et al. Tumor deposits in colorectal cancer: Refining their definition in the TNM system // *A G Surg*. 2023. Vol. 7, N 2. P. 225–235. doi: 10.1002/ags3.12652

26. Santiago I., Figueiredo N., Parés O., et al. MRI of rectal cancer: Relevant anatomy and staging key points // *Insights Imaging*. 2020. Vol. 11, N 1. P. 100. doi: 10.1186/s13244-020-00890-7

27. Ogura A., Konishi T., Cunningham C., et al. Neoadjuvant (chemo)radiotherapy with total mesorectal excision only is not sufficient to prevent lateral local recurrence in enlarged nodes: Results of the multicenter lateral node study of patients with low

cT3/4 rectal cancer // *J Clin Oncol*. 2019. Vol. 37, N 1. P. 33–43. doi: 10.1200/JCO.18.00032

28. Gollub M.J., Costello J.R., Ernst R.D., et al. A primer on rectal MRI in patients on watch-and-wait treatment for rectal cancer // *Abdom Radiol*. 2023. doi: 10.1007/s00261-023-03900-6

29. Березовская Т.П., Дайнеко Я.А., Невольских А.А., и др. Проспективная оценка использования системы mrTRG в определении эффективности неoadъювантной химио-лучевой терапии у больных раком прямой кишки // *Вестник рентгенологии и радиологии*. 2021. Т. 102, № 1. С. 6–17. doi: 10.20862/0042-4676-2021-102-1-6-17

30. Almeida R.R., Souza D., Matalon S.A., et al. Rectal MRI after neoadjuvant chemoradiation therapy: A pictorial guide to interpretation // *Abdom Radiol*. 2021. Vol. 46, N 7. P. 3044–3057. doi: 10.1007/s00261-021-03007-w

31. Шелыгин Ю.А., Чернышов С.В., Казиева Л.Ю., и др. Сравнительный анализ открытой и трансанальной тотальной мезоректумэктомии при раке прямой кишки // *Колопроктология*. 2018. № 4. С. 67–73.

32. Майстренко Н.А., Хватов А.А., Сазонов А.А. Экзентерации малого таза в лечении местнораспространенных опухолей // *Вестник хирургии им. Грекова*. 2014. Т. 173, № 6. С. 37–43.

33. Сидоров Д.В., Алексеев Б.Я., Гришин Н.А., и др. Варианты экзентерации малого таза при местнораспространенном первичном и рецидивном раке прямой кишки // *Онкология. Журнал им. П.А. Герцена*. 2013. № 6. С. 7–13.

REFERENCES

1. Rectal cancer. Clinical recommendations. Approved at the meeting of the Scientific and Practical Council of the Ministry of Health of the Russian Federation. Moscow; 2022. (In Russ). Available from: https://cr.minzdrav.gov.ru/recomend/554_3. Accessed: 15.08.2023.

2. Bogveradze N., Snaebjornsson P., Grotenhuis BA, et al. MRI anatomy of the rectum: Key concepts important for rectal cancer staging and treatment planning. *Insights Imaging*. 2023;14(1):13. doi: 10.1186/s13244-022-01348-8

3. Gollub MJ, Arya S, Beets-Tan RG, et al. Use of magnetic resonance imaging in rectal cancer patients: Society of Abdominal Radiology (SAR) rectal cancer disease-focused panel (DFP) recommendations 2017. *Abdom Radiol*. 2018;43(11):2893–2902. doi: 10.1007/s00261-018-1642-9

4. Nougaret S, Rousset P, Gormly K, et al. Structured and shared MRI staging lexicon and report of rectal cancer: A consensus proposal by the French Radiology Group (GRECAR) and Surgical Group (GRECCAR) for rectal cancer. *Diagn Interv Imaging*. 2022;103(3):127–141. doi: 10.1016/j.diii.2021.08.003

5. Grishko PY, Balyasnikova SS, Samsonov DV, et al. A modern view on the principles of diagnosis and treatment of rectal cancer according to MRI data (literature review). *Medical Visualization*. 2019;23(2):7–26. (In Russ). doi: 10.24835/1607-0763-2019-2-7-26

6. Fernandes MC, Gollub MJ, Brown G. The importance of MRI for rectal cancer evaluation. *Surg Oncol*. 2022;43(4):101739. doi: 10.1016/j.suronc.2022.101739

7. Glynne-Jones R, Wyrwicz L, Tiret E, et al. Rectal cancer: ESMO clinical practice guidelines for diagnosis, treatment and follow-up. *Ann Oncol*. 2017;28(Suppl 4):22–40. doi: 10.1093/annonc/mdx224

8. Beets-Tan R, Lambregts D, Maas M, et al. Magnetic resonance imaging for clinical management of rectal cancer: Updated

recommendations from the 2016 European Society of Gastrointestinal and Abdominal Radiology (ESGAR) consensus meeting. *Eur Radiol*. 2018;28(4):1465–1475. doi: 10.1007/s00330-017-5026-2

9. Oien K, Forsmo HM, Rösler C, et al. Endorectal ultrasound and magnetic resonance imaging for staging of early rectal cancers: How well does it work in practice? *Acta Oncol*. 2019;58(Sup1):49–54. doi: 10.1080/0284186X.2019.1569259

10. Brierley JD, Gospodarowicz MK, Wittekind C. TNM Classification of Malignant Tumours. 8th ed. Wiley-Blackwell; 2017. 272 p.

11. Kikuchi R, Takano M, Takagi K, et al. Management of early invasive colorectal cancer. Risk of recurrence and clinical guidelines. *Dis Colon Rectum*. 1995;38(12):1286–1295. doi: 10.1007/BF02049154

12. Boot J, Gomez-Munoz F, Beets-Tan R. Imaging of rectal cancer. *Radiologe*. 2019;59(Suppl 1):46–50. doi: 10.1007/s00117-019-0579-5

13. Lambregts D, Bogveradze N, Blomqvist L, et al. Current controversies in TNM for the radiological staging of rectal cancer and how to deal with them: Results of a global online survey and multidisciplinary expert consensus. *Eur Radiol*. 2022;32(7):4991–5003. doi: 10.1007/s00330-022-08591-z

14. Mainovskaya OA, Rybakov EG, Chernyshov SV, et al. New morphological risk factors for metastasis to regional lymph nodes in rectal cancer with invasion of the submucosal base. *Coloproctology*. 2021;20(4):22–33. (In Russ). doi: 10.33878/2073-7556-2021-20-4-22-33

15. Volkova SN, Stashuk GA, Chermensky GV, Naumov EK. The role of MRI in the detection of extramural vascular invasion as an indicator of the presence of regional and distant metastases of cancer of the lower ampullary rectum. *Experimental Clin Gastroenterol*. 2019;164(4):66–71. (In Russ). doi: 10.31146/1682-8658-ecg-164-4-66-71

16. Lord AC, D'Souza N, Shaw A, et al. MRI-diagnosed tumor deposits and EMVI status have superior prognostic accuracy to current clinical

TNM staging in rectal cancer. *Ann Surg.* 2022;276(2):334–344. doi: 10.1097/SLA.0000000000004499

17. Roka Z, Simillis C, Kontovounisios C, et al. Locally recurrent rectal cancer according to a standardized MRI classification system: A systematic review of the literature. *J Clin Med.* 2022;11(12):3511. doi: 10.3390/jcm11123511

18. Grishko PY, Mishchenko AV, Ivko OV, et al. The possibilities of multiparametric magnetic resonance imaging in assessing the effectiveness of neoadjuvant treatment of rectal cancer. *Radiation Diagnostics Therapy.* 2019;10(4):49–56. (In Russ).

19. Inoue A, Sheedy SP, Heiken JP, et al. MRI-detected extramural venous invasion of rectal cancer: Multimodality performance and implications at baseline imaging and after neoadjuvant therapy. *Insights Imaging.* 2021;(2):110. doi: 10.1186/s13244-021-01023-4

20. Al-Sukhni E, Milot L, Fruitman M, et al. Diagnostic Accuracy of MRI for assessment of T category, lymph node metastases, and circumferential resection margin involvement in patients with rectal cancer: A systematic review and meta-analysis. *Ann Sur Oncol.* 2012;19(7):2212–2222. doi: 10.1245/s10434-011-2210-5

21. Borgheresi A, De Muzio F, Agostini A, et al. Lymph nodes evaluation in rectal cancer: Where do we stand and future perspective. *J Clin Med.* 2022;11(9):2599. doi: 10.3390/jcm11092599

22. Zhuang Z, Zhang Y, Wei M, et al. Magnetic resonance imaging evaluation of the accuracy of various lymph node staging criteria in rectal cancer: A systematic review and meta-analysis. *Front Oncol.* 2021;(11):709070. doi: 10.3389/fonc.2021.709070

23. Li X, Sun Y, Tang L, et al. Evaluating local lymph node metastasis with magnetic resonance imaging, endoluminal ultrasound and computed tomography in rectal cancer: A meta-analysis. *Color Dis.* 2015;17(6):129–135. doi: 10.1111/codi.12909

24. Weiser MR. AJCC 8th ed. Colorectal cancer. *Ann Surg Oncol.* 2018;25(6):1454–1455. doi: 10.1245/s10434-018-6462-1

25. Ueno H, Nagtegaal ID, Quirke P, et al. Tumor deposits in colorectal cancer: Refining their definition in the TNM system. *A G Surg.* 2023;7(2):225–235. doi: 10.1002/ags3.12652

26. Santiago I, Figueiredo N, Parés O, et al. MRI of rectal cancer: Relevant anatomy and staging key points. *Insights Imaging.* 2020;11(1):100. doi: 10.1186/s13244-020-00890-7

27. Ogura A, Konishi T, Cunningham C, et al. Neoadjuvant (chemo) radiotherapy with total mesorectal excision only is not sufficient to prevent lateral local recurrence in enlarged nodes: Results of the multicenter lateral node study of patients with low cT3/4 rectal cancer. *J Clin Oncol.* 2019;37(1):33–43. doi: 10.1200/JCO.18.00032

28. Gollub MJ, Costello JR, Ernst RD, et al. A primer on rectal MRI in patients on watch-and-wait treatment for rectal cancer. *Abdom Radiol.* 2023. doi: 10.1007/s00261-023-03900-6

29. Berezovskaya TP, Daineko YA, Nevolskikh AA, et al. Prospective evaluation of the use of the MRTG system in determining the effectiveness of neoadjuvant chemoradiotherapy in patients with rectal cancer. *Bulletin Radiol Radiol.* 2021;102(1):6–17. (In Russ). doi: 10.20862/0042-4676-2021-102-1-6-17

30. Almeida RR, Souza D, Matalon SA, et al. Rectal MRI after neoadjuvant chemoradiation therapy: A pictorial guide to interpretation. *Abdom Radiol.* 2021;46(7):3044–3057. doi: 10.1007/s00261-021-03007-w

31. Shelygin YA, Chernyshov SV, Kazieva LY, et al. Comparative analysis of open and transanal total mesorectumectomy in rectal cancer. *Coloproctology.* 2018;(4):67–73. (In Russ).

32. Maistrenko NA, Khvatov AA, Sazonov AA. Pelvic exenterations in the treatment of locally advanced tumors. *Bulletin Surnamed after Grekov.* 2014;173(6):37–43. (In Russ).

33. Sidorov DV, Alekseev BY, Grishin NA, et al. Variants of pelvic exenteration in locally advanced primary and recurrent rectal cancer. *Oncology J named after P.A. Herzen.* 2013;(6):7–13. (In Russ).

ОБ АВТОРАХ

* **Березовская Татьяна Павловна**, д-р мед. наук, профессор;
адрес: Россия, 249036, Обнинск, ул. Королева, д. 4;
ORCID: 0000-0002-3549-4499;
eLibrary SPIN: 5837-3465;
e-mail berez@mrrc.obninsk.ru

Рубцова Наталья Алефтиновна, д-р мед. наук;
ORCID: 0000-0001-8378-4338;
eLibrary SPIN: 9712-9091;
e-mail rna17@ya.ru

Синицын Валентин Евгеньевич, д-р мед. наук, профессор;
ORCID: 0000-0002-5649-2193;
eLibrary SPIN: 8449-6590;
e-mail vsin@mail.ru

Зароднюк Ирина Владимировна, д-р мед. наук;
ORCID: 0000-0002-9442-7480;
eLibrary SPIN: 8310-8989;
e-mail zarodnyuk_iv@gnck.ru

Нуднов Николай Васильевич, д-р мед. наук, профессор;
ORCID: 0000-0001-5994-0468;
eLibrary SPIN: 3018-2527;
e-mail nudnov@rncrr.ru

AUTHORS' INFO

* **Tatiana P. Berezovskaya**, MD, Dr. Sci. (Med.), Professor;
address: 4 Korolev street, 249036 Obninsk, Russia;
ORCID: 0000-0002-3549-4499;
eLibrary SPIN: 5837-3465;
e-mail berez@mrrc.obninsk.ru

Natalia A. Rubtsova, MD, Dr. Sci. (Med.);
ORCID: 0000-0001-8378-4338;
eLibrary SPIN: 9712-9091;
e-mail rna17@ya.ru

Valentin E. Sinitsyn, MD, Dr. Sci. (Med.), Professor;
ORCID: 0000-0002-5649-2193;
eLibrary SPIN: 8449-6590;
e-mail vsin@mail.ru

Irina V. Zarodnyuk, MD, Dr. Sci. (Med.);
ORCID: 0000-0002-9442-7480;
eLibrary SPIN: 8310-8989;
e-mail zarodnyuk_iv@gnck.ru

Nicolai V. Nudnov, MD, Dr. Sci. (Med.), Professor;
ORCID: 0000-0001-5994-0468;
eLibrary SPIN: 3018-2527;
e-mail nudnov@rncrr.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Мищенко Андрей Владимирович, д-р мед. наук;
ORCID: 0000-0001-7921-3487;
eLibrary SPIN: 8825-4704;
e-mail dr.mishchenko@mail.ru

Трубачева Юлия Леонидовна, д-р мед. наук;
ORCID: 0000-0002-8403-195X;
eLibrary SPIN: 3427-9074;
e-mail trubacheva_ul@gnck.ru

Берген Татьяна Андреевна, д-р мед. наук;
ORCID: 0000-0003-1530-1327;
eLibrary SPIN: 5467-7347;
e-mail tbergenl@yandex.ru

Гришко Павел Юрьевич, канд. мед. наук;
ORCID: 0000-0003-4665-6999;
eLibrary SPIN: 3109-1583;
e-mail: dr.grishko@mail.ru

Баласникова Светлана Сергеевна, канд. мед. наук;
ORCID: 0000-0002-9666-9301;
eLibrary SPIN: 3987-2336;
e-mail: Balasnikova.Svetlana@gmail.com

Дайнеко Яна Александровна, канд. мед. наук;
ORCID: 0000-0002-4524-0839;
e-mail vorobeyana@gmail.com

Рыжкова Дарья Викторовна, д-р мед. наук, профессор;
ORCID: 0000-0002-7086-9153;
e-mail d_rjkova@mail.ru

Ходжибекова Малика Маратовна, д-р мед. наук;
ORCID: 0000-0002-2172-5778;
eLibrary SPIN: 3999-7304;
e-mail malika_25@mail.ru

Ручьева Наталья Александровна, канд. мед. наук;
ORCID: 0000-0002-8063-4462;
eLibrary SPIN: 2196-8300;
e-mail: rna1969@yandex.ru

Тюрин Игорь Евгеньевич, д-р мед. наук, профессор;
ORCID: 0000-0002-8587-4422;
eLibrary SPIN: 6499-2398;
e-mail: igortyurin@gmail.com

Ачкасов Сергей Иванович, д-р мед. наук, профессор,
чл.-корр. РАН;
ORCID: 0000-0001-9294-5447;
eLibrary SPIN: 5467-1062;
e-mail achkasovy@mail.ru

Невольских Алексей Алексеевич, д-р мед. наук;
ORCID: 0000-0001-5961-2958;
eLibrary SPIN: 3787-6139;
e-mail: alexey.nevol@gmail.com

Гордеев Сергей Сергеевич, д-р мед. наук;
ORCID: 0000-0002-9303-8379;
eLibrary SPIN: 6577-5540;
e-mail ss.netoncology@gmail.com

Дрошнева Инна Викторовна, канд. мед. наук;
eLibrary SPIN: 1908-2624;
e-mail droshnevainna@mail.ru

Andrei V. Mishchenko, MD, Dr. Sci. (Med.);
ORCID: 0000-0001-7921-3487;
eLibrary SPIN: 8825-4704;
e-mail dr.mishchenko@mail.ru

Yuliya L. Trubacheva, MD, Dr. Sci. (Med.);
ORCID: 0000-0002-8403-195X;
eLibrary SPIN: 3427-9074;
e-mail trubacheva_ul@gnck.ru

Tatiana A. Bergen, MD, Dr. Sci. (Med.);
ORCID: 0000-0003-1530-1327;
eLibrary SPIN: 5467-7347;
e-mail tbergenl@yandex.ru

Pavel Yu. Grishko, MD, Cand. Sci. (Med.);
ORCID: 0000-0003-4665-6999;
eLibrary SPIN: 3109-1583;
e-mail: dr.grishko@mail.ru

Svetlana S. Balyasnikova, MD, Cand. Sci. (Med.);
ORCID: 0000-0002-9666-9301;
eLibrary SPIN: 3987-2336;
e-mail: Balasnikova.Svetlana@gmail.com

Yana A. Dayneko, MD, Cand. Sci. (Med.);
ORCID: 0000-0002-4524-0839;
e-mail vorobeyana@gmail.com

Darya V. Ryjkova, MD, Dr. Sci. (Med.), Professor;
ORCID: 0000-0002-7086-9153;
e-mail d_rjkova@mail.ru

Malika M. Hodzhibekova, MD, Dr. Sci. (Med.);
ORCID: 0000-0002-2172-5778;
eLibrary SPIN: 3999-7304;
e-mail malika_25@mail.ru

Nataliya A. Rucheveva, MD, Cand. Sci. (Med.);
ORCID: 0000-0002-8063-4462;
eLibrary SPIN: 2196-8300;
e-mail: rna1969@yandex.ru

Igor E. Turin, MD, Dr. Sci. (Med.), Professor;
ORCID: 0000-0002-8587-4422;
eLibrary SPIN: 6499-2398;
e-mail: igortyurin@gmail.com

Sergey I. Achkasov, MD, Dr. Sci. (Med.), Professor,
Corresponding Member of the Academy of Sciences;
ORCID: 0000-0001-9294-5447;
eLibrary SPIN: 5467-1062;
e-mail achkasovy@mail.ru

Alexey A. Nevolskikh, MD, Dr. Sci. (Med.);
ORCID: 0000-0001-5961-2958;
eLibrary SPIN: 3787-6139;
e-mail alexey.nevol@gmail.com

Sergey S. Gordeyev, MD, Dr. Sci. (Med.);
ORCID: 0000-0002-9303-8379;
eLibrary SPIN: 6577-5540;
e-mail ss.netoncology@gmail.com

Inna V. Droshneva, MD, Cand. Sci. (Med.);
eLibrary SPIN: 1908-2624;
e-mail droshnevainna@mail.ru

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD530656>

Актуализация формы федерального государственного статистического наблюдения № 3-Д03 «Сведения о дозах облучения пациентов при проведении медицинских рентгенорадиологических исследований»: часть 2 (рекомендации по заполнению формы)

А.В. Водоватов^{1, 2}, Л.А. Чипига^{1, 3, 4}, П.С. Дружинина¹, И.Г. Шацкий¹,
А.В. Петрякова^{1, 5}, С.С. Сарычева¹, А.М. Библин¹, Рустам Р. Ахматдинов¹,
Руслан Р. Ахматдинов¹, Ю.Н. Капырина², А.А. Братилова¹, И.В. Солдатов⁶,
З.А. Лантух⁶, В.Г. Пузырев², С.А. Рыжов^{6, 7, 8}

¹ Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Санкт-Петербург, Российская Федерация;

² Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация;

³ Российский научный центр радиологии и хирургических технологий имени академика А.М. Гранова, Санкт-Петербург, Российская Федерация;

⁴ Национальный медицинский исследовательский центр имени В.А. Алмазова, Санкт-Петербург, Российская Федерация;

⁵ Городская больница № 40 Курортного административного района, Санкт-Петербург, Российская Федерация;

⁶ Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий, Москва, Российская Федерация;

⁷ Ассоциация медицинских физиков России, Москва, Российская Федерация;

⁸ Национальный медицинский исследовательский центр детской гематологии, онкологии и иммунологии имени Дмитрия Рогачева, Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Приказом Росстата № 880 от 30 ноября 2022 года утверждена новая редакция формы федерального статистического наблюдения № 3-Д03 «Сведения о дозах облучения пациентов при проведении медицинских рентгенорадиологических исследований», которая существенно отличается от предыдущей редакции. В частности, скорректирована и изменена структура таблиц формы № 3-Д03 с выделением в отдельные графоклетки высокодозовых исследований; переработан раздел по радионуклидной диагностике с переходом на предоставление информации по уровням облучения пациентов при использовании отдельных радионуклидов с выделением гибридных исследований; внедрены отдельные таблицы с информацией о числе рентгенорадиологических исследований и коллективных дозах для детских пациентов; сокращено количество исследований, для которых представлены типичные (средние) эффективные дозы пациентов.

В рамках настоящей работы представлена структура актуализированной формы № 3-Д03, а также даны рекомендации по её заполнению, направленные на повышение достоверности предоставляемых данных и снижение количества процедурных ошибок.

Данная работа является продолжением статьи Водоватова А.В., Чипиги Л.А., Братиловой А.А., Дружининой П.С., Шацкого И.Г., Петряковой А.В., Сарычевой С.С., Библина А.М., Ахматдинова Р.Р., Капыриной Ю.В., Солдатова И.В., Пузырева В.Г., Рыжова С.А. «Актуализация формы федерального государственного статистического наблюдения № 3-Д03 «Сведения о дозах облучения пациентов при проведении медицинских рентгенорадиологических исследований». Предпосылки к переработке», опубликованной в журнале «Радиационная гигиена» (2023. Т. 16, № 2. С. 126–136. DOI: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2023-16-2-126-136>).

Ключевые слова: единая система контроля и учёта индивидуальных доз облучения граждан; ЕСКИД; дозы облучения; форма № 3-Д03; пациенты; медицинское облучение.

Как цитировать:

Водоватов А.В., Чипига Л.А., Дружинина П.С., Шацкий И.Г., Петрякова А.В., Сарычева С.С., Библин А.М., Ахматдинов Р.Р., Ахматдинов Р.Р., Капырина Ю.Н., Братилова А.А., Солдатов И.В., Лантух З.А., Пузырев В.Г., Рыжов С.А. Актуализация формы федерального государственного статистического наблюдения № 3-Д03 «Сведения о дозах облучения пациентов при проведении медицинских рентгенорадиологических исследований»: часть 2 (рекомендации по заполнению формы) // *Digital Diagnostics*. 2023. Т. 4, № 3. С. 322–339. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD530656>

Рукопись получена: 07.07.2023

Рукопись одобрена: 01.08.2023

Опубликована: 24.08.2023

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD530656>

Update of the federal governmental statistical surveillance form № 3-DOZ: “Data on patient doses from medical X-ray examinations”— Part 2 (FORM completion Recommendations)

Aleksandr V. Vodovатов^{1,2}, Larisa A. Chipiga^{1,3,4}, Polina S. Druzhinina¹, Ilya G. Shatskiy¹, Anastasiya V. Petryakova^{1,5}, Svetlana S. Sarycheva¹, Artem M. Biblin¹, Rustam R. Akhmatdinov¹, Ruslan R. Akhmatdinov¹, Yulia N. Kapyrina², Anzhelika A. Bratilova¹, Ilya V. Soldatov⁶, Zoya A. Lantukh⁶, Victor G. Puzyrev², Sergey A. Ryzhov^{6,7,8}

¹ Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Saint Petersburg, Russian Federation;

² Saint-Petersburg State Pediatric Medical University, Saint Petersburg, Russian Federation;

³ Granov Russian Research Center of Radiology and Surgical Technologies, Saint Petersburg, Russian Federation;

⁴ Almazov National Medical Research Centre, Saint Petersburg, Russian Federation;

⁵ City Hospital No. 40 of the Kurortny administrative district, Saint Petersburg, Russian Federation;

⁶ Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies, Moscow, Russian Federation;

⁷ Association of Medical Physicists in Russia, Moscow, Russian Federation;

⁸ Dmitry Rogachev National Medical Research Center of Pediatric Hematology, Oncology and Immunology, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

The form of federal governmental statistical surveillance № 3-DOZ, titled “Data on patient doses from medical X-ray examinations,” has changed significantly by the order of Rosstat N 880. In particular, the structure of the form’s has been revised: studies involving high doses were dedicated from the rest; the section on radionuclide diagnostics has been redesigned; the information on the levels of patient exposure when using individual radionuclides and in hybrid studies have been displayed; information on the number of radiological studies and collective doses for pediatric patients have been introduced; and the number of studies for which typical (average) effective doses of patients are presented has been reduced. The structure of the updated form № 3-DOZ is presented within the framework of this work.

In this article, recommendations for filling out № 3-DOZ have been developed in order to increase the reliability of the data provided and reduce the number of procedural errors.

This work is a continuation of the article Vodovатов A.V., Chipiga L.A., Bratilova A.A., Druzhinina P.S., Shatskiy I.G., Petryakova A.V., Sarycheva S.S., Biblin A.M., Akhmatdinov R.R., Kapyrina Yu.N., Soldatov I.V., Puzyrev V.G., and Ryzhov S.A. “Update of the federal governmental statistical surveillance form № 3-DOZ “Data on patient doses from medical X-ray examinations”. Perquisites for the update, published in the journal *Radiatsionnaya Gygiena* (2023. Vol. 16, N 2. P. 126–136. DOI: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2023-16-2-126-136>).

Keywords: unified system of individual dose control of the Russian federation citizens; effective dose; form № 3-DOZ; patients; medical exposure.

To cite this article:

Vodovатов AV, Chipiga LA, Druzhinina PS, Shatskiy IG, Petryakova AV, Sarycheva SS, Biblin AM, Akhmatdinov RR, Akhmatdinov RR, Kapyrina YuN, Bratilova AA, Soldatov IV, Lantukh ZA, Puzyrev VG, Ryzhov SA. Update of the federal governmental statistical surveillance form № 3-DOZ: “Data on patient doses from medical X-ray examinations”— Part 2 (FORM completion Recommendations). *Digital Diagnostics*. 2023;4(3):322–339. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD530656>

Received: 07.07.2023

Accepted: 01.08.2023

Published: 24.08.2023

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD530656>

更新第3-DOZ号联邦国家统计观察表《医疗X射线放射检查期间患者所受辐射剂量的信息》：第2部分（填表建议）

Aleksandr V. Vodovатов^{1,2}, Larisa A. Chipiga^{1,3,4}, Polina S. Druzhinina¹, Ilya G. Shatskiy¹, Anastasiya V. Petryakova^{1,5}, Svetlana S. Sarycheva¹, Artem M. Biblin¹, Rustam R. Akhmatdinov¹, Ruslan R. Akhmatdinov¹, Yulia N. Kapyrina², Anzhelika A. Bratilova¹, Ilya V. Soldatov⁶, Zoya A. Lantukh⁶, Victor G. Puzyrev², Sergey A. Ryzhov^{6,7,8}

¹ Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Saint Petersburg, Russian Federation;

² Saint-Petersburg State Pediatric Medical University, Saint Petersburg, Russian Federation;

³ Granov Russian Research Center of Radiology and Surgical Technologies, Saint Petersburg, Russian Federation;

⁴ Almazov National Medical Research Centre, Saint Petersburg, Russian Federation;

⁵ City Hospital No. 40 of the Kurortny administrative district, Saint Petersburg, Russian Federation;

⁶ Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies, Moscow, Russian Federation;

⁷ Association of Medical Physicists in Russia, Moscow, Russian Federation;

⁸ Dmitry Rogachev National Medical Research Center of Pediatric Hematology, Oncology and Immunology, Moscow, Russian Federation

简评

俄罗斯国家统计局2022年11月30日第880号命令批准了新版第3-DOZ号联邦统计观察表《医疗X射线放射检查期间患者所受辐射剂量的信息》，该表与旧版有很大不同。特别是对第3-DOZ号表中的表格结构进行了调整和更改，将高剂量检查分配到单独的栏目中；重新设计了放射性核素诊断部分，过渡到提供使用单个放射性核素时患者受照射水平的信息以及混合检查的分配；引入了单独的表格，其中包含儿科患者的X射线放射检查数量和集体剂量信息；减少了提供患者典型（平均）有效剂量的检查数量。

本文介绍更新后的第3-DOZ号表的结构，并对其填写提出了建议，旨在提高所提供数据的可靠性并减少程序性错误的数量。

本文是Vodovатов A.V.、Chipiga L.A.、Bratilova A.A.、Druzhinina P.S.、Shatsky I.G.、Petryakova A.V.、Sarycheva S.S.、Biblin A.M.、Akhmatdinov R.R.、Kapyrina Y.V.、Soldatov I.V.、Puzyrev V.G.和Ryzhov S.A.、Ryzhov S.A.《更新第3-DOZ号联邦国家统计观察表《医疗X射线放射检查期间患者辐射剂量的信息》。修订的前提条件》文章的续篇，发表于《辐射卫生》杂志（2023。Vol.16, №2. P.126–136。DOI: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2023-16-2-126-136>）。

关键词：公民个人辐射剂量统一控制和核算系统；USMID；辐射剂量；第3-DOZ号表；患者；医疗照射。

引用本文：

Vodovатов AV, Chipiga LA, Druzhinina PS, Shatskiy IG, Petryakova AV, Sarycheva SS, Biblin AM, Akhmatdinov RR, Akhmatdinov RR, Kapyrina YuN, Bratilova AA, Soldatov IV, Lantukh ZA, Puzyrev VG, Ryzhov SA. 更新第3-DOZ号联邦国家统计观察表《医疗X射线放射检查期间患者所受辐射剂量的信息》：第2部分（填表建议）。*Digital Diagnostics*. 2023;4(3):322–339. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD530656>

收到：07.07.2023

接受：01.08.2023

发布日期：24.08.2023

ВВЕДЕНИЕ

Форма № 3-Д03 позволяет оценивать тренды изменения структуры лучевой диагностики и коллективных доз, обусловленных медицинским облучением населения Российской Федерации [1–3]. Материалы, полученные в ходе сбора форм № 3-Д03, используются при подготовке радиационно-гигиенических паспортов территорий Российской Федерации, а также государственного доклада о санитарно-эпидемиологическом благополучии населения [4, 5]. Результаты анализа формы № 3-Д03 используются при подготовке ежегодных сборников «Дозы облучения населения Российской Федерации» [6].

Приказом Росстата № 880¹ от 30 ноября 2022 года утверждена новая редакция формы федерального статистического наблюдения № 3-Д03 «Сведения о дозах облучения пациентов при проведении медицинских рентгенодиагностических исследований», которая существенно отличается от привычного варианта, утверждённого последовательно постановлением Росстата от 21 сентября 2006 года № 51² и приказом Росстата от 16 октября 2013 года № 411³. С 2006 года изменений в форму не вносились, за исключением коррекции методики её заполнения и содержания титульного листа. В новом варианте формы № 3-Д03 были реализованы следующие принципиальные изменения:

- скорректирована и изменена структура таблиц формы № 3-Д03 с выделением в отдельные графоклетки высокодозовых исследований: компьютерная томография (КТ) с применением рентгеноконтрастных препаратов; КТ нескольких анатомических областей (грудная клетка + брюшная полость; брюшная полость + таз; всё тело), интервенционные и рентгенохирургические исследования;
- переработан раздел по радионуклидной диагностике с переходом на предоставление информации по уровням облучения пациентов при использовании отдельных радионуклидов с выделением гибридных исследований: позитронно-эмиссионная

томография, совмещённая с рентгеновской компьютерной томографией (ПЭТ/КТ); однофотонная эмиссионная компьютерная томография, совмещённая с рентгеновской компьютерной томографией (ОФЭКТ/КТ);

- классификация КТ и интервенционных (специальных) исследований гармонизирована с формой № 30 Минздрава;
- внедрены отдельные таблицы с информацией о числе рентгенодиагностических исследований и коллективных дозах для детских пациентов;
- сокращено количество исследований, для которых представлены типичные (средние) эффективные дозы пациентов.

Предпосылки к внедрению данных положений были подробно описаны авторами в предыдущей работе [7].

Большой объём внедрённых изменений может быть ассоциирован с различными сложностями при заполнении актуализированной формы, в связи с чем авторами была поставлена цель подготовить рекомендации и разъяснения по порядку заполнению актуализированной формы № 3-Д03.

В первые годы после внедрения актуализированной формы 3-Д03 специалисты, ответственные за её заполнение, могут сталкиваться с трудностями, поэтому в рамках данной работы сформулированы рекомендации по заполнению формы 3-Д03. Отдельные регионы также совместно с ФБУН «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (далее — ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева) выпускают обучающий материал и автоматизируют сдачу отчётности через веб-ресурсы [8, 9].

Представляется целесообразным детально описать структуру актуализированной формы № 3-Д03, выделить ключевые особенности заполнения и сформулировать набор рекомендаций для обеспечения достоверности её заполнения с тем, чтобы снизить ошибки при заполнении, связанные с переходом на новую форму.

¹ Приказ Росстата от 30.11.2022 № 880 «Об утверждении формы федерального статистического наблюдения с указаниями по ее заполнению для организации Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека федерального статистического наблюдения за санитарным состоянием субъекта Российской Федерации». Режим доступа: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=437635>.

² Постановление Росстата от 21.09.2006 № 51 «Об утверждении статистического инструментария для организации Роспотребнадзором статистического наблюдения за заболеваемостью населения инфекционными и паразитарными болезнями, профилактическими прививками, санитарным состоянием территорий, детских и подростковых летних оздоровительных учреждений, о дезинфекционной деятельности, о дозах облучения». Режим доступа: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=223414>.

³ Приказ Росстата от 16.10.2013 № 411 «Об утверждении статистического инструментария для организации Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека федерального статистического наблюдения за санитарным состоянием территорий, профессиональными заболеваниями (отравлениями), дозами облучения». Режим доступа: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=443740>.

СТРУКТУРА АКТУАЛИЗИРОВАННОЙ ФОРМЫ № 3-ДОЗ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ЕЁ ЗАПОЛНЕНИЮ, НАПРАВЛЕННЫЕ НА ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ПРЕДОСТАВЛЯЕМЫХ ДАННЫХ И СНИЖЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ПРОЦЕДУРНЫХ ОШИБОК

Общие положения

Первым принципиальным отличием актуализированной формы № 3-ДОЗ от старой является изменение титульного листа в соответствии с действующим законодательством⁴. На бланке старой формы в качестве субъектов официального статистического учёта были указаны органы исполнительной власти субъектов Российской Федерации: Главное управление специальных программ Президента Российской Федерации, Управление делами Президента Российской Федерации, ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии», ФБУН «Научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева». На основании части 1 статьи 5 Федерального закона от 29 ноября 2007 года № 282-ФЗ⁵ (далее — Закон о статучёте) официальный статистический учёт в Российской Федерации осуществляется субъектами официального статистического учёта. Пункт 4 статьи 2 Закона о статучёте содержит исчерпывающий перечень субъектов официального статистического учёта, в который указанные выше органы и организации не входят. На бланке формы подлежат указанию только респонденты и субъекты официального статистического учёта, а одни и те же органы не могут одновременно рассматриваться в качестве самостоятельных субъектов официального статистического учёта и респондентов по форме. В ходе разработки актуализированного варианта формы № 3-ДОЗ было достигнуто компромиссное решение: на титульном листе оставлены только респонденты (юридические лица и индивидуальные предприниматели, использующие источники ионизирующих излучений в медицинских целях) и субъекты (Роспотребнадзор) статистического учёта.

При этом вся процедура заполнения и сдачи формы № 3-ДОЗ принципиально не изменялась. Медицинская организация направляет формы за отчётный год в срок

до 1 апреля органу исполнительной власти субъекта Российской Федерации в сфере охраны здоровья; учреждениям, структурным подразделениям федеральных органов исполнительной власти, указанным в пункте 4 Положения об осуществлении федерального государственного санитарно-эпидемиологического надзора в Российской Федерации, утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 15 июня 2013 года № 476⁶ (по принадлежности). Органы исполнительной власти субъекта Российской Федерации в сфере охраны здоровья до 1 мая предоставляют данные в ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии» в субъекте Российской Федерации. ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии» в субъекте Российской Федерации до 15 мая предоставляет данные Управлению Роспотребнадзора по субъекту Российской Федерации. Управления Роспотребнадзора по субъектам Российской Федерации до 1 июня предоставляют данные в ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева.

ФБУН НИИРГ имени П.В. Рамзаева, Федеральное медико-биологическое агентство, структурные подразделения Министерства обороны Российской Федерации, Министерства внутренних дел Российской Федерации, Федеральной службы безопасности Российской Федерации, Федеральной службы войск национальной гвардии Российской Федерации, Федеральной службы охраны Российской Федерации, Федеральной службы исполнения наказаний, Главного управления специальных программ Президента Российской Федерации и Управления делами Президента Российской Федерации соответственно в Вооружённых Силах Российской Федерации, других войсках, воинских формированиях и органах, на объектах обороны и оборонного производства, безопасности, внутренних дел и иного специального назначения в соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации от 5 июня 2013 года № 476⁷ (по принадлежности) также предоставляют сводные отчётные данные в Роспотребнадзор до 15 мая.

Содержательная часть актуализированной формы 3-ДОЗ состоит из 3 разделов (10 таблиц): 1-й и 2-й разделы посвящены рентгенологическим исследованиям, 3-й — радионуклидным исследованиям. В свою очередь, в первом разделе (таблицы 1100, 1200, 1300, 1400) представлены данные по процедурам, при которых

⁴ Приказ Росстата от 30.11.2022 № 880 «Об утверждении формы федерального статистического наблюдения с указаниями по ее заполнению для организации Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека федерального статистического наблюдения за санитарным состоянием субъекта Российской Федерации». Режим доступа: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=437635>.

⁵ Федеральный закон от 29.11.2007 № 282-ФЗ «Об официальном статистическом учёте и системе государственной статистики в Российской Федерации». Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_72844/.

⁶ Постановление Правительства РФ от 05.06.2013 № 476 «О вопросах государственного контроля (надзора) и признании утратившими силу некоторых актов Правительства Российской Федерации» (с изменениями и дополнениями). Режим доступа: <https://base.garant.ru/70394016/>.

⁷ Там же.

не проводился контроль и учёт доз облучения пациентов⁸. Следует отметить, что отсутствие контроля и учёта доз противоречит требованиям статьи 18 Федерального закона «О радиационной безопасности населения»⁹ и СанПиН 2.6.1.1192-03¹⁰, поэтому заполнение таблиц 1-го раздела формы допускается временно как исключение. Во всех медицинских учреждениях должен вестись контроль и учёт индивидуальных доз облучения пациентов при проведении рентгенологических исследований.

Второй раздел (таблицы 2100, 2200, 2300, 2400) содержит данные по процедурам, при которых дозы пациентов оценивались на основе измеряемых показателей. Первые два раздела состоят из 4 таблиц: со сведениями о коллективных дозах облучения пациентов, числе рентгеновских процедур для детских (0–17 лет) и взрослых (старше 18 лет) пациентов. Все сведения предоставляются в абсолютных числах.

Таблицы формы 3-ДОЗ 1100, 1300, 2100 и 2300 содержат информацию о дозах, полученных пациентами при проведении рентгенологических исследований с целью диагностики и лечения. В таблицы 1100 (взрослые пациенты) и 1300 (детские пациенты) должны вноситься коллективные дозы, полученные с использованием статистических данных о количестве проведённых в отчётном году рентгенологических процедур различного вида и средних индивидуальных дозах для каждого вида процедур (по процедурам, при которых не проводился контроль и учёт доз облучения пациентов). Информация в таблицах 1100, 1300, 2100 и 2300 не должна дублироваться.

В таблицы 2100 (взрослые пациенты) и 2300 (детские пациенты) должны вноситься коллективные дозы, полученные с использованием стандартных доз облучения пациентов при проведении рентгенологических процедур (по процедурам, при которых проводился контроль и учёт доз облучения пациентов)¹¹.

В графах 3–12 таблиц 1100, 1300, 2100 и 2300 указываются данные в соответствии с различными видами рентгенологических диагностических и лечебных процедур, которые приведены в названиях соответствующих граф.

Сводная информация о различиях в структуре старой и актуализированной форм № 3-ДОЗ представлены в табл. 1.

Рекомендации по заполнению табличной части форм 3-ДОЗ

Медицинские организации должны предоставлять форму, заполненную по всем действующим источникам медицинского диагностического облучения, включая рентгеноэндоваскулярные и рентгенохирургические процедуры. Данные по процедурам лучевой и радионуклидной терапии, а также радионуклидной диагностики *in vitro* в форму № 3-ДОЗ не вносятся. В отделениях лучевой терапии форма № 3-ДОЗ заполняется по всем диагностическим исследованиям, выполняемым в рамках подготовки пациента к курсу лучевой терапии (дозиметрического планирования). Магнитно-резонансная томография и ультразвуковые исследования также не включаются в форму, т.к. данные виды исследований не связаны с облучением пациентов ионизирующим излучением.

Форма № 3-ДОЗ позволяет учитывать число выполненных рентгенорадиологических процедур и рентгенорадиологических исследований. Под рентгенорадиологической процедурой понимается разовое облучение пациента при выполнении исследования данной анатомической области (один рентгеновский снимок), под рентгенорадиологическим исследованием — полный цикл исследования определённого органа (анатомической области) пациента, который может включать несколько процедур, в том числе в разных проекциях и/или различного вида (рис. 1). Для всех комплексных исследований (рентгеноскопические, интервенционные, радионуклидные исследования, совмещённые с КТ) форма № 3-ДОЗ заполняется только по числу исследований; отдельные структурные элементы рентгенорадиологических исследований (например, КТ-часть при ОФЭКТ/КТ или ПЭТ/КТ; рентгеновские снимки, выполненные в ходе рентгеноскопии или интервенционного исследования) не выделяются (см. рис. 1).

Общее число рентгенорадиологических исследований не может превышать общее число рентгенорадиологических процедур для данного органа или анатомической области, но может быть меньше последнего.

⁸ Методические рекомендации «Заполнение формы федерального государственного статистического наблюдения № 3-ДОЗ». Проект. Режим доступа: http://niirg.ru/PDF/MR_3-DOS_2013.pdf.

⁹ Федеральный закон от 09.01.1996 № 3-ФЗ (ред. от 18.03.2023) «О радиационной безопасности населения». Статья 18. Контроль и учёт индивидуальных доз облучения. Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_8797/2d546164990e9137dc5b194a17843d8762e08451

¹⁰ Постановление Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 18.02.2003 № 8 «О введении в действие СанПиН 2.6.1.1192-03» (вместе с «СанПиН 2.6.1.1192-03. 2.6.1. Ионизирующее излучение, радиационная безопасность. Гигиенические требования к устройству и эксплуатации рентгеновских кабинетов, аппаратов и проведению рентгенологических исследований. Санитарные правила и нормативы»). Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_41439/.

¹¹ Методические указания МУК 2.6.1.1797-03 «Контроль эффективных доз облучения пациентов при медицинских рентгенологических исследованиях» (<https://docs.cntd.ru/document/1200035983>); Методические указания МУ 2.6.1.3151-13 «Оценка и учёт эффективных доз у пациентов при проведении радионуклидных диагностических исследований» (<https://base.garant.ru/70747326/>).

Таблица 1. Изменение структуры актуализированной формы № 3-Д03

Раздел	Старая	Новая	Характеристика метода определения эффективных доз
Рентгенологические исследования, расчётный метод оценки доз	Коллективная доза — 1000. Число процедур — 1100	Коллективная доза, взрослые — 1000. Число процедур, взрослые — 1100 Коллективная доза, дети — 1300. Число процедур, дети — 1400	Средние значения эффективных доз из справочной литературы [10, 11]
Рентгенологические исследования, контроль доз	Коллективная доза — 2000. Число процедур — 2100	Коллективная доза, взрослые — 2100. Число процедур, взрослые — 2200 Коллективная доза, дети — 2300. Число процедур, дети — 2400	Стандартные эффективные дозы, определённые в соответствии с действующими нормативно-методическими документами ¹²
Количество проведённых радионуклидных исследований и полученные при этом эффективные дозы облучения пациентов	3000	Взрослые — 3100 Дети — 3200	Стандартные эффективные дозы, определённые в соответствии с действующими нормативно-методическими документами ¹³

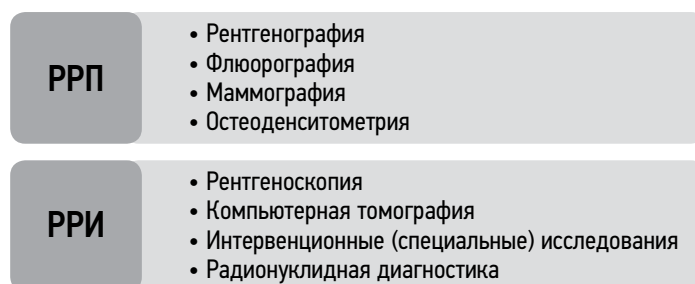


Рис. 1. Разделение методов лучевой диагностики с использованием ионизирующего излучения на процедуры и исследования. РРП — рентгенорадиологические процедуры; РРИ — рентгенорадиологические исследования.

При отнесении рентгенорадиологических исследований / рентгенорадиологических процедур к той или иной анатомической области рекомендовано использовать классификацию Федерального справочника инструментальных диагностических исследований [12].

Рентгенограммы. В столбец «Рентгенограммы» (графы 3, 4) должны включаться сведения об эффективных дозах, полученных пациентами при проведении рентгенографических исследований (двухмерное проекционное

рентгеновское изображение), флюорографических исследований органов грудной клетки и скрининговых исследований молочных желёз.

Сведения о рентгенологических исследованиях, выполненных на аналоговых рентгеновских аппаратах, необходимо вносить в графу 3, на цифровых аппаратах — в графу 4.

Следует обратить внимание на отсутствие выделенного сегмента формы № 3-Д03 для флюорографических

¹² Методические указания 2.6.1.3584-19. 2.6.1. Ионизирующее излучение, радиационная безопасность. Изменения в МУ 2.6.1.2944-11 «Контроль эффективных доз облучения пациентов при проведении медицинских рентгенологических исследований» (https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_368034/); Методические рекомендации МР 2.6.1.0296-22 «Оптимизация радиационной защиты пациентов в лучевой диагностике посредством применения референтных диагностических уровней» (<https://base.garant.ru/405781973/>).

¹³ Методические указания МУ 2.6.1.3151-13 «Оценка и учет эффективных доз у пациентов при проведении радионуклидных диагностических исследований» (<https://base.garant.ru/70747326/>); Методические рекомендации МР 2.6.1.0296-22 «Оптимизация радиационной защиты пациентов в лучевой диагностике посредством применения референтных диагностических уровней» (<https://base.garant.ru/405781973/>).

исследований (скрининговых рентгенографических исследований органов грудной клетки.) Данные о флюорографических исследованиях, выполненные на фото- и рентгеновской плёнке, вносятся в графу 3 (плёночные рентгенограммы) строки 2 (из них за счёт профилактических процедур). Данные о флюорографических исследованиях, выполненных на цифровых рентгеновских аппаратах (У-дуги, сканирующие флюорографы и пр.), вносятся в графу 4 (цифровые рентгенограммы) строки 2 (из них за счёт профилактических процедур). Все исследования, которые были выполнены на аппаратах для флюорографии, заносятся в строки для соответствующих

анатомических областей граф 3 и 4 для аналоговых и цифровых аппаратов соответственно.

Данные о скрининговых исследованиях молочных желёз, выполненные на аналоговых аппаратах, вносятся в графу 3 строки 22, выполненные на цифровых аппаратах и системах компьютерной радиографии — в графу 4 строки 22.

Общая информация об изменении табличной части формы № 3-Д03 по рентгенографическим исследованиям представлена в табл. 2.

Рентгеноскопии. К рентгеноскопии относятся исследования с введением контрастного вещества перорально,

Таблица 2. Изменение структуры сведений о рентгенограммах в актуализированной форме № 3-Д03

Область исследования в старой форме № 3-Д03	Строка старой формы № 3-Д03	Область исследования в актуализированной форме № 3-Д03	Строка актуализированной формы № 3-Д03	Комментарий
Органы грудной клетки	Строка 01 (2000)	Органы грудной клетки	Взрослые — Строка 01 (2100) Дети — Строка 01 (2300)	С учётом как профилактических, так и диагностических исследований
Органы грудной клетки, из них за счёт профилактических процедур	Строка 02 (2000)	Органы грудной клетки, из них за счёт профилактических процедур	Взрослые — Строка 02 (2100) Дети — Строка 02 (2300)	В новой форме в данную строку заносятся все флюорографические (скрининговые) исследования органов грудной клетки (плёночные и цифровые)
Конечности	Строка 03 (2000)	Верхние конечности	Взрослые — Строка 07 (2100) Дети — Строка 07 (2300)	-
		Нижние конечности	Взрослые — Строка 08 (2100) Дети — Строка 08 (2300)	
Шейные позвонки	Строка 04 (2000)	Шейный отдел позвоночника	Взрослые — Строка 09 (2100) Дети — Строка 09 (2300)	-
Грудные позвонки	Строка 05 (2000)	Грудной отдел позвоночника	Взрослые — Строка 10 (2100) Дети — Строка 10 (2300)	-
Поясничные позвонки	Строка 06 (2000)	Поясничный отдел позвоночника	Взрослые — Строка 11 (2100) Дети — Строка 11 (2300)	-
Таз и бедро	Строка 07 (2000)	Органы малого таза	Взрослые — Строка 12 (2100) Дети — Строка 12 (2300)	-
		Тазобедренный сустав	Взрослые — Строка 13 (2100) Дети — Строка 13 (2300)	
Рёбра и грудина	Строка 08 (2000)	Рёбра и грудина	Взрослые — Строка 14 (2100) Дети — Строка 14 (2300)	-
Органы брюшной полости	Строка 09 (2000)	Органы брюшной полости	Взрослые — Строка 15 (2100) Дети — Строка 15 (2300)	-
Верхняя часть желудочно-кишечного тракта	Строка 10 (2000)	Верхняя часть желудочно-кишечного тракта	Заполнению не подлежит	Заполнению не подлежит

Таблица 2. Окончание

Область исследования в старой форме № 3-Д03	Строка старой формы № 3-Д03	Область исследования в актуализированной форме № 3-Д03	Строка актуализированной формы № 3-Д03	Комментарий
Нижняя часть желудочно-кишечного тракта	Строка 11 (2000)	Нижняя часть желудочно-кишечного тракта	Заполнению не подлежит	Заполнению не подлежит
Череп, челюстно-лицевая область	Строка 12 (2000)	Череп, головной мозг, челюстно-лицевая область	Взрослые — Строка 18 (2100) Дети — Строка 18 (2300)	-
Зубы	Строка 13 (2000)	Зубы	Взрослые — Строка 19 (2100) Дети — Строка 19 (2300)	Прицельные снимки — Строка 19, столбцы 03/04 Ортопантомограммы — Строка 19, столбец 04
Почки, мочевыводящая система	Строка 14 (2000)	Почки, мочевыводящая система	Взрослые — Строка 20 (2100) Дети — Строка 20 (2300)	в том числе и ирригоскопии
Молочная железа	Строка 15 (2000)	Молочная железа	Взрослые — Строка 21 (2100) Дети — Строка 21 (2300)	-
из них за счёт профилактических процедур	Строка 16 (2000)	в том числе за счёт профилактических процедур (из строки 21)	Взрослые — Строка 22 (2100) Дети — Строка 22 (2300)	-
Прочие	Строка 17 (2000)	Прочие	Взрослые — Строка 26 (2100) Дети — Строка 26 (2300)	-
Всего	Строка 18 (2000)	Всего	Взрослые — Строка 27 (2100) Дети — Строка 27 (2300)	-

ректально и через урологический катетер. Примеры заполнения граф «Рентгеноскопия» в актуализированной форме № 3-Д03 приведены в табл. 3.

Компьютерные томографии. В актуализированной форме 3-Д03 появилось разделение КТ на проведённые с контрастированием и без него. Сведения о КТ-исследованиях для детских и взрослых пациентов, выполненных с применением контраста, должны вноситься в графу 7, без применения контраста — в графу 6.

Необходимо отметить, что в актуализированной форме 3-Д03 стало возможным детально представлять сведения об КТ-исследованиях системы кровообращения — сердца, коронарных сосудов, грудной и брюшной аорты.

Необходимо помнить, что отдельные КТ-сканирования учёту не подлежат. Одно КТ-исследование может включать одно или несколько сканирований одной анатомической области. Например, одно КТ-исследование печени или почек и мочевыводящих путей с внутривенным

Таблица 3. Примеры заполнения граф «Рентгеноскопия» в актуализированной форме № 3-Д03

Рентгеноскопическое исследование	Локализация	Строка актуализированной формы № 3-Д03	Тип процедуры для определения эффективных доз ¹⁴
Рентгеноскопия грудной клетки	Грудная клетка	Строка 01 — Органы грудной клетки	Лёгкие
Рентгенография грудного отдела и ликворопроводящих путей позвоночника с контрастированием	Грудной отдел позвоночника, ликворопроводящие пути спинного мозга	Строка 10 — Грудной отдел позвоночника	Грудной отдел позвоночника

¹⁴ Методические указания МУ 2.6.1.3584-19 «Изменения в МУ 2.6.1.2944-19 "Контроль эффективных доз облучения пациентов при проведении медицинских рентгенологических исследований"». Режим доступа: <https://base.garant.ru/73515396/>.

Таблица 3. Окончание

Рентгеноскопическое исследование	Локализация	Строка актуализированной формы № 3-Д03	Тип процедуры для определения эффективных доз ¹⁴
Рентгеноскопия желудка и двенадцатиперстной кишки с контрастированием. Рентгеноскопия желудка и двенадцатиперстной кишки с двойным контрастированием	Желудок, двенадцатиперстная кишка	Строка 15 — Органы брюшной полости	Желудок
Рентгеноскопия глотки, пищевода с контрастированием. Рентгеноскопия пищевода с контрастированием	Глотка, пищевод	Строка 16 — Верхняя часть желудочно-кишечного тракта	Пищевод
Рентгенография пассажа контрастного вещества по кишечнику	Желудочно-кишечный тракт	Строка 17 — Нижняя часть желудочно-кишечного тракта	Кишечник
Рентгеноскопия тонкой кишки через илеостому	Тонкая кишка	Строка 17 — Нижняя часть желудочно-кишечного тракта	Кишечник
Рентгеноскопия толстой кишки с контрастированием. Рентгеноскопия толстой кишки с двойным контрастированием	Толстая кишка	Строка 17 — Нижняя часть желудочно-кишечного тракта	Кишечник
Рентгеноскопия прямой кишки с функциональными пробами. Рентгеноскопия прямой кишки в процессе дефекации	Прямая кишка	Строка 17 — Нижняя часть желудочно-кишечного тракта	Кишечник
Рентгенография фистулы околоносовых пазух	Околоносовые пазухи	Строка 18 — Череп, головной мозг, челюстно-лицевая область	Череп

контрастированием может включать от 1 до 5 сканирований, но учитывается как одно исследование. Для многофазных КТ-исследований с введением контрастного вещества учитывается суммарная доза за все фазы.

Информация о скрининге рака лёгкого с применением низкодозовых КТ вносится в строку 2 графы 6, о томосинтезе молочной железы — в строку 22 графы 6.

Для исследования двух и более анатомических областей или анатомической области и отдельного органа в актуализированной форме предусмотрены отдельные строки, информация о таких исследованиях вносится в строки 23–25. Информация о КТ-исследованиях всего тела вносится в строку 25 «Прочие».

Общая информация об изменении табличной части формы № 3-Д03 по КТ-исследованиям представлена в табл. 4.

Интервенционные исследования. В актуализированной форме 3-Д03 существенно переработан раздел по интервенционным (специальным) исследованиям. В рамках гармонизации с формой № 30 «Сведения о медицинской организации» Минздрава Российской Федерации¹⁵ все интервенционные исследования разделены на 4 подгруппы: внутрисосудистые (ангиографии и рентгеноэндоваскулярные процедуры) и внесосудистые (хирургические процедуры под контролем рентгеновской медицинской визуализации); диагностические (только визуализация) и терапевтические (хирургические вмешательства под контролем рентгеновского излучения).

В графы 8–11 вносят все интервенционные вмешательства, выполненные в рентгеноперационных, рентгеновских кабинетах, а также вне специально оборудованных помещений (например, в операционных, процедурных

¹⁵ Приказ Росстата от 30.12.2020 № 863 (ред. от 20.12.2021) «Об утверждении форм федерального статистического наблюдения с указаниями по их заполнению для организации Министерством здравоохранения Российской Федерации федерального статистического наблюдения в сфере охраны здоровья». Форма федерального статистического наблюдения № 30 «Сведения о медицинской организации». Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_373430/d752954a35641c33df844c2e2d910dcb3154d0a2/.

Таблица 4. Компьютерно-томографические исследования

Область исследования в старой форме № 3-Д03	Строка старой формы № 3-Д03	Область исследования в актуализированной форме № 3-Д03	Строка актуализированной формы № 3-Д03	Комментарий
Органы грудной клетки	Строка 01 (2000)	Органы грудной клетки	Взрослые — Строка 01 (2100) Дети — Строка 01 (2300)	-
Органы грудной клетки, из них за счёт профилактических процедур	Строка 02 (2000)	Органы грудной клетки, из них за счёт профилактических процедур	Взрослые — Строка 02 (2100) Дети — Строка 02 (2300)	Сведения о скрининге рака лёгкого с использованием низкодозовой компьютерной томографии. Сведения о периодических медицинских осмотрах декретированных групп с использованием компьютерной томографии
Отсутствует	Отсутствует	Сердце	Взрослые — Строка 03 (2100) Дети — Строка 03 (2300)	-
Отсутствует	Отсутствует	Сердце, из них на коронарных сосудах	Взрослые — Строка 04 (2100) Дети — Строка 04 (2300)	-
Отсутствует	Отсутствует	Грудная аорта	Взрослые — Строка 05 (2100) Дети — Строка 05 (2300)	-
Отсутствует	Отсутствует	Брюшная аорта	Взрослые — Строка 06 (2100) Дети — Строка 06 (2300)	-
Конечности	Строка 03 (2000)	Верхние конечности	Взрослые — Строка 07 (2100) Дети — Строка 07 (2300)	-
		Нижние конечности	Взрослые — Строка 08 (2100) Дети — Строка 08 (2300)	-
Шейные позвонки	Строка 04 (2000)	Шейный отдел позвоночника	Взрослые — Строка 09 (2100) Дети — Строка 09 (2300)	-
Грудные позвонки	Строка 05 (2000)	Грудной отдел позвоночника	Взрослые — Строка 10 (2100) Дети — Строка 10 (2300)	-
Поясничные позвонки	Строка 06 (2000)	Поясничный отдел позвоночника	Взрослые — Строка 11 (2100) Дети — Строка 11 (2300)	-
Таз и бедро	Строка 07 (2000)	Органы малого таза	Взрослые — Строка 12 (2100) Дети — Строка 12 (2300)	-
		Тазобедренный сустав	Взрослые — Строка 13 (2100) Дети — Строка 13 (2300)	-
Рёбра и грудина	Строка 08 (2000)	Рёбра и грудина	Взрослые — Строка 14 (2100) Дети — Строка 14 (2300)	-
Органы брюшной полости	Строка 09 (2000)	Органы брюшной полости	Взрослые — Строка 15 (2100) Дети — Строка 15 (2300)	-
Верхняя часть желудочно-кишечного тракта	Строка 10 (2000)	Верхняя часть желудочно-кишечного тракта	Взрослые — Строка 16 (2100) Дети — Строка 16 (2300)	-

Таблица 4. Окончание

Область исследования в старой форме № 3-Д03	Строка старой формы № 3-Д03	Область исследования в актуализированной форме № 3-Д03	Строка актуализированной формы № 3-Д03	Комментарий
Нижняя часть желудочно-кишечного тракта	Строка 11 (2000)	Нижняя часть желудочно-кишечного тракта	Взрослые — Строка 17 (2100) Дети — Строка 17 (2300)	-
Череп, челюстно-лицевая область	Строка 12 (2000)	Череп, головной мозг, челюстно-лицевая область	Взрослые — Строка 18 (2100) Дети — Строка 18 (2300)	-
Зубы	Строка 13 (2000)	Зубы	Взрослые — Строка 19 (2100) Дети — Строка 19 (2300)	-
Почки, мочевыводящая система	Строка 14 (2000)	Почки, мочевыводящая система	Взрослые — Строка 20 (2100) Дети — Строка 20 (2300)	-
Молочная железа	Строка 15 (2000)	Молочная железа	Взрослые — Строка 21 (2100) Дети — Строка 21 (2300)	-
Из них за счёт профилактических процедур	Строка 16 (2000)	в том числе за счёт профилактических процедур (из строки 21)	Взрослые — Строка 22 (2100) Дети — Строка 22 (2300)	Графа 7 «Компьютерные томографии с контрастированием» для данной строки заполнению не подлежит
Отсутствует	Отсутствует	Грудная клетка + брюшная полость	Взрослые — Строка 23 (2100) Дети — Строка 23 (2300)	-
Отсутствует	Отсутствует	Грудная клетка + брюшная полость + таз	Взрослые — Строка 24 (2100) Дети — Строка 24 (2300)	-
Отсутствует	Отсутствует	Брюшная полость + таз	Взрослые — Строка 24 (2100) Дети — Строка 24 (2300)	-
Прочие	Строка 17 (2000)	Прочие	Взрослые — Строка 26 (2100) Дети — Строка 26 (1300)	Компьютерные томографии всего тела, выполненные в рамках рентгеновской диагностики
Всего	Строка 18 (2000)	Всего	Взрослые — Строка 27 (2100) Дети — Строка 27 (2300)	-

кабинетах, приёмных отделениях) с использованием передвижных рентгенохирургических аппаратов.

Критерии отнесения рентгенорадиологических исследований в каждой из конкретных подгрупп представлены в Указаниях по заполнению формы федерального статистического наблюдения № 30 «Сведения о медицинской организации», утверждённых приказом Росстата от 27 декабря 2022 года № 985¹⁶.

Графы 8–11 включают сведения, связанные с интервенционными рентгенохирургическими (внесосудистыми)

и рентгеноэндоваскулярными вмешательствами под лучевым контролем, выполненные как с целью диагностики (графы 8, 9), так и с целью лечения (графы 10, 11). В данный раздел также вносятся сведения об исследованиях с внутривенным контрастированием.

Внутрисосудистые исследования (графы 8, 10) представляют собой исследования сосудов под контролем методов лучевой визуализации с использованием инструментов для малоинвазивных вмешательств. К ним относятся такие исследования, как аортография, каваграфия,

¹⁶ Приказ Росстата от 27.12.2022 № 985 «Об утверждении форм федерального статистического наблюдения с указаниями по их заполнению для организации Министерством здравоохранения Российской Федерации федерального статистического наблюдения в сфере охраны здоровья». Режим доступа: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=439986>.

флебография, ангиография, ангиокардиография, коронарография, лимфография, ангиопластика, эндопротезирование, эмболизация, реканализация, шунтирование и дилатация сосудов и др.

Внесосудистые исследования (графы 9, 11) включают в себя любые исследования внутренних органов под контролем методов лучевой визуализации с использованием инструментов для малоинвазивных вмешательств. К ним относятся такие исследования, как цистография, холангиодренирование, нефростомия, литотрипсия, урография, стентирование почек и мочеточника, гистеросальпингография, артроскопия, остеосинтез, вертебропластика, кифопластика, установка интрамедуллярного штифта и др.

Прочие. В графу 12 вносятся сведения об исследованиях, не вошедших в графы 3–11.

Информацию об остеоденситометриях вносят в графу «Прочие» в строку в соответствии с анатомической областью исследования. В строки 23–25 вносятся сведения о комплексных исследованиях двух и более анатомических областей. При этом данные виды исследований необходимо учитывать только в строках 23–25 без дублирования в строках 01–22.

Радионуклидная диагностика. Значительные изменения претерпел раздел 3 «Информация о радионуклидных исследованиях». Значительно расширилась номенклатура исследований — с 10 в старой форме 3-Д03 до 20 в актуализированной.

В таблицы 3100 и 3200 следует заносить информацию о количестве проведённых в отчётном году радионуклидных исследований и о полученных при этом коллективных дозах детских и взрослых пациентов. Под количеством радионуклидных исследований в графах 3–6 таблиц 3100 и 3200 следует понимать количество лиц, которым был введён радиофармпрепарат. При этом, независимо от числа последующих сканирований (измерений), все они рассматриваются как одно исследование.

Рекомендации по заполнению (перечень видов исследований), позволяющие отнести исследование к той или иной группе:

- строка «Скелет» включает остеосцинтиграфии;
- строка «Трёхфазное исследование» включает трёхфазные исследования мягких тканей и костей;
- строка «Печень/селезёнка» включает динамические и статические исследования печени и селезёнки;
- строка «Щитовидная железа (Тс)» включает исследования щитовидной железы с радиофармпрепаратами, мечеными ^{99m}Tc ;
- строка «Щитовидная железа (I)» включает исследования щитовидной железы с радиофармпрепаратами, мечеными ^{123}I ;

- строка «Паращитовидная железа» включает исследования паращитовидной железы (если дополнительно проводят исследование щитовидной железы, то такое исследование дополнительно учитывается в соответствующей строке «Щитовидная железа» — строка 04 или 05);
- строка «Нейроэндокринная система (I)» включает исследования с ^{123}I -МИБГ;
- строка «Головной мозг» включает исследования головного мозга, перфузионные исследования головного мозга;
- строка «Лёгкие» включает перфузионные исследования лёгких, вентиляционные исследования лёгких;
- строка «Сердце» включает исследования миокарда, исследования миокарда с функциональными пробами, исследования симпатической нервной системы миокарда, радионуклидные вентрикулографии;
- строка «Лимфатическая система» включает исследования лимфатической системы, исключая исследования сторожевых узлов;
- строка «Лимфатические сторожевые узлы» включает исследования лимфатических сторожевых узлов;
- строка «Почки (Тс)» включает ренографии, динамические и статические исследования почек с радиофармпрепаратами, мечеными ^{99m}Tc ;
- строка «Почки (I)» включает динамические и статические исследования почек с радиофармпрепаратами, мечеными ^{123}I ;
- строка «Всё тело» включает исследования всего тела для выявления воспалительных или онкологических очагов, включая ПЭТ/КТ-исследования;
- строка «Исследования с туморотропными радиофармпрепаратами» включает исследования с туморотропными радиофармпрепаратами, исключая ПЭТ/КТ исследования;
- строка «Ангиографии и флебографии» включает радионуклидные ангиографии и флебографии;
- строка «Желудочно-кишечный тракт» включает исследования желудка, пищевода, кишечника;
- строка «Прочие» включает исследования, не вошедшие в строки 01–18.

Для гибридных ПЭТ/КТ- и ОФЭКТ/КТ-исследований информацию о числе исследований вносят в графу 3, информацию о коллективной дозе от радиофармпрепарата — в графу 7, а от КТ-сканирования — в графу 8. Оценка доз облучения пациентов для каждого исследования осуществляется в медицинской организации в соответствии с МУ 2.6.1.3700–21¹⁷. В указаниях даны значения дозовых коэффициентов с учётом возраста пациента для большинства радиофармпрепаратов, используемых в Российской Федерации.

¹⁷ Методические указания МУ 2.6.1.3700–21 «Оценка и учёт эффективных доз у пациентов при проведении радионуклидных диагностических исследований». Режим доступа: <https://base.garant.ru/403589750/>.

РАДИАЦИОННО-ГИГИЕНИЧЕСКАЯ ПАСПОРТИЗАЦИЯ

Заполненная форма 3-Д03 является информационной основой для формирования радиационно-гигиенического паспорта организации. Правила переноса данных из формы 3-Д03 в радиационно-гигиенический паспорт организации приведены в табл. 5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 2022 году многолетняя работа по актуализации формы 3-Д03 была завершена. Актуализированный вариант формы 3-Д03 позволяет значительно повысить объём собираемых сведений о структуре лучевой диагностики и коллективных дозах от медицинского облучения. В форме 3-Д03 возможно получить информацию

о высокодозовых рентгенорадиологических исследованиях: многофазных КТ с внутривенным контрастированием, КТ-исследованиях нескольких анатомических областей, гибридных исследованиях (ПЭТ/КТ, ОФЭКТ/КТ), полном спектре интервенционных и радионуклидных процедур. Это позволяет выделить данные исследования из общей номенклатуры, так как именно данные исследования ассоциированы с высокими индивидуальными дозами пациентов (>20 мЗв за процедуру).

Впервые в отечественной (и зарубежной) практике реализована возможность получать информацию о дозах облучения и структуре диагностических процедур для детских пациентов. Требования к порядку сдачи форм 3-Д03 уровня организации и субъекта остались неизменными. Реализованные изменения позволят существенно увеличить потенциал формы 3-Д03 для анализа уровней медицинского облучения

Таблица 5. Порядок заполнения радиационно-гигиенического паспорта организации на основе данных актуализированной формы 3-Д03

Виды процедур	Количество процедур за отчётный год, шт./год (сумма данных из таблиц 1200+1400+2200+2400, кроме радионуклидных исследований)	Средняя индивидуальная доза, мЗв/процедура	Коллективная доза, чел.-Зв/год (сумма данных из таблиц 1100+1300+2100+2300, кроме радионуклидных исследований)	Измеренные дозы, %
Флюорографические	Строка 02 столбец 3 + Строка 02 столбец 4	Коллективная доза / количество процедур×1000	Строка 02 столбец 3 + Строка 02 столбец 4	Сумма значений из таблиц 2200+2400 / Сумма значений из таблиц 1200+1400+2200+2400
Рентгенографические	Строка 27 столбец 3 + Строка 27 столбец 4 — (Строка 02 столбец 3 + Строка 02 столбец 4)	Коллективная доза / количество процедур×1000	Строка 27 столбец 3 + Строка 27 столбец 4 — (Строка 02 столбец 3 + Строка 02 столбец 4)	Сумма значений из таблиц 2200+2400 / Сумма значений из таблиц 1200+1400+2200+2400
Рентгеноскопические	Строка 27 столбец 5	Коллективная доза / количество процедур×1000	Строка 27 столбец 5	Сумма значений из таблиц 2200+2400 / Сумма значений из таблиц 1200+1400+2200+2400
Компьютерная томография	Строка 27 столбец 6 + Строка 27 столбец 7	Коллективная доза / количество процедур×1000	Строка 27 столбец 6 + Строка 27 столбец 7	Сумма значений из таблиц 2200+2400 / Сумма значений из таблиц 1200+1400+2200+2400
Специальные исследования	Сумма строк 27 столбцы 8–11	Коллективная доза / количество процедур×1000	Сумма строк 27 столбцы 8–11	Сумма значений из таблиц 2200+2400 / Сумма значений из таблиц 1200+1400+2200+2400
Радионуклидные исследования	Таблицы 3100+3200 Строка 20 столбец 6	Коллективная доза / количество процедур×1000, или Строка 20 столбец 11	Таблицы 3100+3200 Строка 20 столбец 10	—
Прочие	Строка 27 столбец 12	Коллективная доза / количество процедур×1000	Строка 27 столбец 12	Сумма значений из таблиц 2200+2400 / Сумма значений из таблиц 1200+1400+2200+2400

населения Российской Федерации и принятия управленческих решений.

В связи со значительным объёмом изменений специалисты ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева разрабатывают новое программное обеспечение для заполнения формы 3-ДОЗ. Подробная инструкция по использованию нового программного обеспечения будет представлена авторами в следующей работе.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках НИР «Совершенствование и развитие методов сбора сведений о дозах облучения пациентов при проведении медицинских рентгенодиагностических исследований в Российской Федерации с учётом утверждения новой формы 3-ДОЗ» и НИР «Научное развитие медико-технологических и организационных аспектов обеспечения радиационной безопасности при оказании медицинской помощи» (№ ЕГИСУ: № 123031500006-9) в соответствии с Приказом от 21.12.2022 № 1196 «Об утверждении государственных заданий, финансовое обеспечение которых осуществляется за счёт средств бюджета города Москвы государственным бюджетным (автономным) учреждениям, подведомственным Департаменту здравоохранения города Москвы, на 2023 год и плановый период 2024 и 2025 годов» Департамента здравоохранения города Москвы.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Вклад авторов. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение поисково-аналитической работы и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распределён следующим образом: А.В. Водоватов — дизайн отчёта, определение целей и задач, подготовка черновика рукописи, представление окончательного варианта рукописи для публикации в журнале; Л.А. Чипига — разработка изменений в структуру представления данных о радионуклидной диагностике в форме № 3-ДОЗ, подготовка разделов по изменениям представления данных по радионуклидной диагностике; А.А. Братилова — анализ текущего состояния формы № 3-ДОЗ, редактирование промежуточного варианта рукописи; П.С. Дружинина — разработка изменений в структуру представления данных о компьютерной томографии, участие в подготовке разделов рукописи по компьютерной томографии; И.Г. Шацкий — разработка разделов формы № 3-ДОЗ по детским пациентам, подготовка раздела рукописи по детским пациентам; А.В. Петрякова — разработка изменений в структуру представления данных о радионуклидной диагностике в форме № 3-ДОЗ, участие в подготовке разделов рукописи по радионуклидной диагностике; С.С. Сарычева — разработка изменений в структуру представления данных по интервенционным исследованиям в форме № 3-ДОЗ, участие в подготовке разделов рукописи по интервенционным исследованиям; А.М. Библин — общее

руководство исследованием, редактирование промежуточного варианта рукописи; Рустам Р. Ахматдинов, Руслан Р. Ахматдинов — подготовка раздела рукописи по изменениям в программном обеспечении для заполнения формы № 3-ДОЗ; Ю.В. Капырина — разработка изменений в структуру представления данных по интервенционным исследованиям для детских пациентов в форме № 3-ДОЗ, участие в подготовке разделов рукописи по интервенционным исследованиям; И.В. Солдатов — работа по гармонизации формы № 3-ДОЗ со статистическими формами Минздрава, подготовка соответствующего раздела рукописи; З.А. Лантух — разработка рекомендаций по заполнению формы № 3-ДОЗ, редактирование промежуточного варианта рукописи; В.Г. Пузырев — работа по гармонизации формы № 3-ДОЗ со статистическими формами Минздрава, подготовка соответствующего раздела рукописи; С.А. Рыжов — поиск и анализ литературных данных, редактирование промежуточного варианта рукописи.

ADDITIONAL INFORMATION

Funding source. The article was performed within framework of project “Development and improvement of dose data collection methods for patients undergoing X-ray examinations in the Russian Federation considering the approval of new version of form № 3-DOZ” and part of the research and development effort titled “Scientific advances in medical, technological and organizational aspects of radiation safety in health care” (USIS No. №123031500006-9) in accordance with the Order No. 1196 dated December 21, 2022 “On approval of state assignments funded by means of allocations from the budget of the city of Moscow to the state budgetary (autonomous) institutions subordinate to the Moscow Health Care Department, for 2023 and the planned period of 2024 and 2025” issued by the Moscow Health Care Department.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work. A.V. Vodovатов developed design of the study, determined aims and objectives, prepared draft of the manuscript and presented the final version of manuscript for submission; L.A. Chipiga developed the changes in the structure of data on diagnostic nuclear medicine in form № 3-DOZ, prepared sections of manuscript on nuclear medicine; A.A. Bratilova performed analysis of the current state of form № 3-DOZ, edited the draft versions of the manuscript; P.S. Druzhinina developed the changes in the structure of data on computed tomography in form № 3-DOZ, prepared sections of manuscript on computed tomography; I.G. Shatskiy developed the changes in the structure of data on pediatric patients in form № 3-DOZ, prepared sections of manuscript on pediatric exposure; A.V. Petryakova developed the changes in the structure of data on diagnostic nuclear medicine in form № 3-DOZ, prepared sections of manuscript on nuclear medicine; S.S. Sarycheva developed the

changes in the structure of data on interventional examinations in form №3-DOZ, prepared sections of manuscript on interventional examinations; A.M. Biblin was responsible for the management of the study, edited draft versions of the manuscript; Rustam R. Akhmatdinov, Ruslan R. Akhmatdinov prepared section on the changes in software; Yu.V. Kapyrina developed the changes in the structure of data on interventional examinations in form №3-DOZ, prepared sections of manuscript on interventional examinations;

I.V. Soldatov developed approaches for harmonization of form №3-DOZ with statistical form of the Ministry of Healthcare; Z.A. Lantukh developed approaches for harmonization of form №3-DOZ with statistical form of the Ministry of Healthcare, edited draft version of manuscript; V.G. Puzyrev developed approaches for harmonization of form №3-DOZ with statistical form of the Ministry of Healthcare; S.A. Ryzhov performed literature review, edited draft version of manuscript.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Онищенко Г.Г., Попова А.Ю., Романович И.К., и др. Радиационно-гигиеническая паспортизация и ЕСКИД — информационная основа принятия управленческих решений по обеспечению радиационной безопасности населения Российской Федерации. Сообщение 1. Основные достижения и задачи по совершенствованию // Радиационная гигиена. 2017. Т. 10, № 3. С. 7–17. doi: 10.21514/1998-426X-2017-10-3-7-17
2. Рыжов С.А., Водоватов А.В., Солдатов И.В., и др. Предложения по совершенствованию системы радиационной безопасности при медицинском облучении. Часть 1. Анализ информации, содержащейся в государственных отчетных формах и информационных базах данных, на примере города Москвы // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 3. С. 92–109. doi: 10.21514/1998-426X-2022-15-3-92-109
3. Симонова В.Г. Анализ уровней облучения населения Орловской области при рентгенорадиологических исследованиях // Санитарный врач. 2023. № 3. С. 186–192. doi: 10.33920/med-08-2303-07
4. Барковский А.Н., Кормановская Т.А., Водоватов А.В., и др. Формирование блока данных об уровнях облучения населения России для включения в Государственный доклад о состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 4. С. 134–141. doi: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-134-141
5. Роспотребнадзор. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2020 году: Государственный доклад. Москва: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2021. 256 с.
6. Барковский А.Н., Ахматдинов Р.Р., Ахматдинов Р.Р., и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2020 году: информационный сборник. Санкт-Петербург, 2021. 80 с.

7. Водоватов А.В., Чипига Л.А., Братилова А.А., и др. Актуализация формы федерального государственного статистического наблюдения № 3-ДОЗ «Сведения о дозах облучения пациентов при проведении медицинских рентгенорадиологических исследований». Предпосылки к переработке // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 2. С. 126–136. doi: 10.21514/1998-426X-2023-16-2-126-136
8. Центр диагностики и телемедицины [интернет]. Отчет 3-ДОЗ. Режим доступа: <https://3doz.telemedai.ru/>. Дата обращения: 04.05.2023.
9. Дружинина Ю.В., Толкачев К.В., Рыжов С.А., и др. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021622191. Данные Discm-файлов рентгенологических исследований, проведенных на компьютерных томографах: № 2021622060: заявл. 06.10.2021; опубл. 19.10.2021; заявитель Государственное бюджетное учреждение здравоохранения города Москвы «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы».
10. Водоватов А.В., Голиков В.Ю., Кальницкий С.А., и др. Анализ уровней облучения взрослых пациентов при проведении наиболее распространенных рентгенографических исследований в Российской Федерации в 2009–2014 гг. // Радиационная гигиена. 2017. Т. 10, № 3. С. 66–75. doi: 10.21514/1998-426X-2017-10-3-66-75
11. Балонов М.И., Голиков В.Ю., Водоватов А.В., и др. Научные основы радиационной защиты в современной медицине. Т. 1. Лучевая диагностика / под ред. профессора М.И. Балонова. Санкт-Петербург, 2019. 320 с.
12. Федеральный справочник инструментальных диагностических исследований. Режим доступа: <https://fnsi2.rt-eu.ru/dictionaries/1.2.643.5.1.13.13.11.1471/passport/2.17>. Дата обращения: 04.05.2023.

REFERENCES

1. Onischenko GG, Popova AYU, Romanovich IK, et al. Modern principles of the radiation protection from sources of ionizing radiation in medicine. Part 2: radiation risks and development of the system of radiation protection. *Radiatsionnaya Gygiena*. 2017;10(3):7–17. (In Russ). doi: 10.21514/1998-426X-2017-10-3-7-17
2. Ryzhov SA, Vodovatov AV, Soldatov IV, et al. Proposals for Improving the System of Radiation Safety in Medical Exposure. Part 1. Analysis of information contained in state reporting forms and information databases in Moscow. *Radiatsionnaya Gygiena*. 2022;15(3):92–109. (In Russ). doi: 10.21514/1998-426X-2022-15-3-92-109
3. Simonova VG. Analysis of the radiation levels of the population of the Orel region during X-ray radiological studies. *Sanitarniy Vrach*. 2023;(3):186–192. doi: 10.33920/med-08-2303-07

4. Barkovsky AN, Kormanovskaya TA, Vodovatov AV, et al. Management of data on the exposure of the Russian population for the State report on evaluation of sanitary-epidemiological well-being of the public in the Russian Federation. *Radiatsionnaya Gygiena*. 2022;15(4):134–141. (In Russ). doi: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-134-141
5. Rosпотребнадзор. On the state of sanitary-epidemiological wellbeing of public in the Russian Federation in 2020: State report. Moscow: Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; 2021. 256 p. (In Russ).
6. Barlovsky AN, Akhmatdinov RR, Akhmatdinov RR, et al. Radiation situation on the territory of the Russian Federation in 2021: Reference book. Saint Petersburg; 2022. 76 p. (In Russ).

7. Vodovатов AV, Chipiga LA, Bratilova AA, et al. Update of the federal governmental statistical surveillance form № 3-DOZ "Data on patient doses from medical X-ray examinations". Perquisites for the update. *Radiatsionnaya Gygiyena*. 2023;16(2):126–136. (In Russ). doi: 10.21514/1998-426X-2023-16-2-126-136
8. Center for Diagnostics and Telemedicine [Internet]. 3-DOZ report. (In Russ). Available from: <https://3doz.telemedai.ru/>. Accessed: 04.05.2023.
9. Druzhinina YuV, Tolkachev KV, Ryzhov SA, et al. Certificate of state registration of the database No. 2021622191. Data of Dicom files of X-ray examinations conducted on computed tomographs: No. 2021622060: application 06.10.2021: publ. 19.10.2021; applicant State Budgetary Institution of Healthcare of the city of Moscow "Scientific and Practical Clinical Center for Diagnostics and

Telemedicine Technologies of the Department of Healthcare of the City of Moscow". (In Russ).

10. Vodovатов AV, Golikov VYu, Kalnitsky SA, et al. Evaluation of levels of exposure of adult patients from common radiographic examinations in the Russian Federation in 2009–2014. *Radiatsionnaya Gygiyena*. 2017;10(3):66–75. (In Russ). doi: 10.21514/1998-426X-2017-10-3-66-75
11. Balonov MI, Golikov VYu, Vodovатов AV, et al. Scientific foundations of radiation protection in modern medicine. Vol. 1. Radiation diagnostics. Ed. by M.I. Balonov. Saint Petersburg; 2019. 320 p. (In Russ).
12. Federal Handbook of Instrumental Diagnostic Studies. (In Russ). Available from: <https://fnsi2.rt-eu.ru/dictionaries/1.2.643.5.1.13.13.11.1471/passport/2.17>. Accessed: 04.05.2023.

ОБ АВТОРАХ

*** Водоватов Александр Валерьевич**, канд. биол. наук, доцент;
адрес: Россия, 197101, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8;
ORCID: 0000-0002-5191-7535;
eLibrary SPIN: 4560-8978;
e-mail: vodovatoff@gmail.com

Чипига Лариса Александровна, канд. тех. наук, доцент;
ORCID: 0000-0001-9153-3061;
eLibrary SPIN: 3920-7798;
e-mail: larisa.chipiga@gmail.com

Дружинина Полина Сергеевна;
ORCID: 0000-0003-2921-067X;
eLibrary SPIN: 9003-3234;
e-mail: druzhininapauline@gmail.com

Шацкий Илья Геннадьевич;
ORCID: 0000-0003-2809-0223;
eLibrary SPIN: 4905-3329;
e-mail: i.Shatskiy@niirg.ru

Петрякова Анастасия Валерьевна;
ORCID: 0000-0003-2663-9091;
eLibrary SPIN: 1683-4733;
e-mail: nastya.petryakova@gmail.com

Сарычева Светлана Сергеевна;
ORCID: 0000-0002-4493-0280;
eLibrary SPIN: 5132-1416;
e-mail: svetlana2003@mail.ru

Библин Артем Михайлович;
ORCID: 0000-0002-3139-2479;
eLibrary SPIN: 7840-0144;
e-mail: a.biblin@niirg.ru

Ахматдинов Рустам Расимович;
ORCID: 0000-0002-4151-5380;
eLibrary SPIN: 7379-4951;
e-mail: rust.akh@niirg.ru

AUTHORS' INFO

*** Aleksandr V. Vodovатов**, Cand. Sci. (Biol.), Assistant Professor;
address: 8 Mira street, 197101 Saint Petersburg, Russia;
ORCID: 0000-0002-5191-7535;
eLibrary SPIN: 4560-8978;
e-mail: vodovatoff@gmail.com

Larisa A. Chipiga, Cand. Sci. (Tech), Assistant Professor;
ORCID: 0000-0001-9153-3061;
eLibrary SPIN: 3920-7798;
e-mail: larisa.chipiga@gmail.com

Polina S. Druzhinina;
ORCID: 0000-0003-2921-067X;
eLibrary SPIN: 9003-3234;
e-mail: druzhininapauline@gmail.com

Ilya G. Shatskiy;
ORCID: 0000-0003-2809-0223;
eLibrary SPIN: 4905-3329;
e-mail: i.Shatskiy@niirg.ru

Anastasiya V. Petryakova;
ORCID: 0000-0003-2663-9091;
eLibrary SPIN: 1683-4733;
e-mail: nastya.petryakova@gmail.com

Svetlana S. Sarycheva;
ORCID: 0000-0002-4493-0280;
eLibrary SPIN: 5132-1416;
e-mail: svetlana2003@mail.ru

Artem M. Biblin;
ORCID: 0000-0002-3139-2479;
eLibrary SPIN: 7840-0144;
e-mail: a.biblin@niirg.ru

Rustam R. Akhmatdinov;
ORCID: 0000-0002-4151-5380;
eLibrary SPIN: 7379-4951;
e-mail: rust.akh@niirg.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Ахматдинов Руслан Расимович;

ORCID: 0009-0000-2300-6788;

eLibrary SPIN: 7255-4107;

e-mail: rusl.akh@niirg.ru

Капырина Юлия Николаевна;

ORCID: 0000-0002-1018-5200;

eLibrary SPIN: 4969-0394;

e-mail: kapirina-yuliya@yandex.ru

Братилова Анжелика Анатольевна;

ORCID: 0000-0002-6489-3974;

eLibrary SPIN: 3156-7214;

e-mail: bratilova@gmail.com

Солдатов Илья Владимирович;

ORCID: 0000-0002-4867-0746;

eLibrary SPIN: 4065-6048;

e-mail: SoldatovIV2@zdrav.mos.ru

Лантух Зоя Александровна;

ORCID: 0000-0001-6623-9610;

eLibrary SPIN: 5486-6496;

e-mail: LantukhZA@zdrav.mos.ru

Пузырев Виктор Геннадьевич, канд. мед. наук, доцент;

ORCID: 0000-0002-0185-3545;

eLibrary SPIN: 2727-0049;

e-mail: vgpuzyrev@mail.ru

Рыжов Сергей Анатольевич;

ORCID: 0000-0002-0640-7368;

eLibrary SPIN: 6595-4011;

e-mail: mosrg@mail.ru

Ruslan R. Akhmatdinov;

ORCID: 0009-0000-2300-6788;

eLibrary SPIN: 7255-4107;

e-mail: rusl.akh@niirg.ru

Yuliya N. Kapyrina;

ORCID: 0000-0002-1018-5200;

eLibrary SPIN: 4969-0394;

e-mail: kapirina-yuliya@yandex.ru

Anzhelika A. Bratilova;

ORCID: 0000-0002-6489-3974;

eLibrary SPIN: 3156-7214;

e-mail: bratilova@gmail.com

Ilya V. Soldatov;

ORCID: 0000-0002-4867-0746;

eLibrary SPIN: 4065-6048;

e-mail: SoldatovIV2@zdrav.mos.ru

Zoya A. Lantukh;

ORCID: 0000-0001-6623-9610;

eLibrary SPIN: 5486-6496;

e-mail: LantukhZA@zdrav.mos.ru

Viktor G. Puzyrev, MD, Cand. Sci. (Med.), Assistant Professor;

ORCID: 0000-0002-0185-3545;

eLibrary SPIN: 2727-0049;

e-mail: vgpuzyrev@mail.ru

Sergey A. Ryzhov;

ORCID: 0000-0002-0640-7368;

eLibrary SPIN: 6595-4011;

e-mail: mosrg@mail.ru

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD420053>

Дозиомика в анализе медицинских изображений и перспективы её использования в клинической практике

В.А. Солодкий, Н.В. Нуднов, М.Е. Иванников, Э.С.-А. Шахвалиева,
В.М. Сотников, А.Ю. Смыслов

Российский научный центр рентгенорадиологии, Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. В последние годы увеличивается количество статей с использованием термина «дозеомика», однако литературные обзоры на русском языке по данной теме отсутствуют.

Цель настоящего обзора — описать основные принципы дозеомики как направления радиомики и проанализировать исследования по оценке возможностей применения их в клинической практике.

Материалы и методы. Систематический поиск литературы был произведён в базе данных PubMed с поисковым запросом «dosimics OR dosiomic», а также в базе данных eLibrary с поисковым запросом «дозеомика». По состоянию на апрель 2023 года были опубликованы 43 зарубежных исследования на тему использования дозеомики в клинической практике и одна отечественная работа с определением термина «дозеомика».

Результаты. Проанализированы 43 зарубежных исследования на тему использования дозеомики в клинической практике и 1 отечественная статья с определением термина «дозеомика». Проанализированные работы разделены на три группы согласно их тематике и составлены таблицы, описывающие результаты 27 исследований по прогнозированию клинических исходов.

Заключение. В настоящее время дозеомика является новым и перспективным направлением радиомики, применяемым в текстурном анализе медицинских изображений, связанных с лучевым лечением онкологических больных. Дозеомика может способствовать развитию более персонализированного подхода к планированию лучевой терапии, прогнозированию лучевых повреждений нормальных тканей и диагностике рецидивов.

Ключевые слова: дозеомика; радиомика; лучевая терапия; машинное обучение; искусственный интеллект; текстурный анализ; постлучевой пневмонит.

Как цитировать:

Солодкий В.А., Нуднов Н.В., Иванников М.Е., Шахвалиева Э.С.-А., Сотников В.М., Смыслов А.Ю. Дозеомика в анализе медицинских изображений и перспективы её использования в клинической практике // *Digital Diagnostics*. 2023. Т. 4, № 3. С. 340–355. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD420053>

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD420053>

Dosimomics in the analysis of medical images and prospects for its use in clinical practice

Vladimir A. Solodkiy, Nikolay V. Nudnov, Mikhail E. Ivannikov,
Elina S-A. Shakhvalieva, Vladimir M. Sotnikov, Aleksei Yu. Smyslov

Russian Scientific Center of Roentgenoradiology, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: In recent years, there has been a notable increase in the number of articles using the term “dosimomics”. However, there are no literature reviews on this topic in the Russian language.

AIM: This study aims to describe the basic principles of dosimomics as a derivative of radiomics and to analyze studies devoted to assessing the possibilities of its application in clinical practice.

MATERIALS AND METHODS: A systematic literature search was performed in the PubMed database using the search query “dosimomics OR dosiomic”, and in the eLibrary database using the search query “dosimomics”. By April 2023, 43 foreign articles and 1 Russian article had been published.

RESULTS: The analysis encompassed 43 foreign studies investigating the use of dosimomics in clinical practice, alongside one Russian article that provided a definition of the term “dosimomics”. The analyzed papers were divided into three groups according to their subject matter, and two tables describing the results of 27 studies on the prediction of clinical outcomes were created.

CONCLUSION: Currently, dosimomics is a new and promising derivative of radiomics used in the textural analysis of medical images associated with radiation treatment of cancer patients. Dosimomics can contribute to the development of a more personalized approach to the planning of radiotherapy, the prediction of radiation damage of normal tissues, and the diagnosis of recurrence.

Keywords: dosimomics; radiomics; radiation therapy; machine learning; artificial intelligence; texture analysis; radiation pneumonitis.

To cite this article:

Solodkiy VA, Nudnov NV, Ivannikov ME, Shakhvalieva ES-A, Sotnikov VM, Smyslov AYU. Dosimomics in the analysis of medical images and prospects for its use in clinical practice. *Digital Diagnostics*. 2023;4(3):340–355. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD420053>

Received: 15.05.2023

Accepted: 15.06.2023

Published: 30.08.2023

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD420053>

医学图像分析中的Dosiomics及其在临床实践中的应用前景

Vladimir A. Solodkiy, Nikolay V. Nudnov, Mikhail E. Ivannikov,
Elina S-A. Shakhvalieva, Vladimir M. Sotnikov, Aleksei Yu. Smyslov

Russian Scientific Center of Roentgenoradiology, Moscow, Russian Federation

简评

论证。近年来，使用“dosiomics”一词的文章数量不断增加，但却没有关于这一主题的俄文文献综述。

本综述的目的是描述dosiomics作为放射组学分支的基本原理，并分析相关研究，以评估其在临床实践中的潜在应用。

材料和方法。在PubMed数据库中以“dosiomics OR dosiomic”为检索词进行了系统文献检索，在eLibrary数据库中以“дозимика”（“dosiomics”）为检索词进行了系统文献检索。截至2023年4月，共发表了43项关于在临床实践中使用dosiomics的国外研究和1篇定义“dosiomics”一词的国内文章。

结果。我们分析了43篇关于在临床实践中使用dosiomics的国外研究和1篇定义“dosiomics”一词的国内文章。我们将所分析的文章按主题分为三组，并将27项关于预测临床结果的研究结果编制成表格。

结论。目前，dosiomics是放射组学的一个新的有前途的分支，应用于与癌症患者放射治疗有关的医学图像的纹理分析。Dosiomics可能有助于开发更个性化的放疗计划、预测对正常组织的辐射损伤和诊断复发。

关键词：dosiomics；放射组学；放射治疗；机器学习；人工智能；纹理分析；放疗后肺炎。

引用本文：

Solodkiy VA, Nudnov NV, Ivannikov ME, Shakhvalieva ES-A, Sotnikov VM, Smyslov AYU. 医学图像分析中的Dosiomics及其在临床实践中的应用前景. *Digital Diagnostics*. 2023;4(3):340–355. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD420053>

收到: 15.05.2023

接受: 15.06.2023

发布日期: 30.08.2023

ВВЕДЕНИЕ

Лучевая терапия является одним из наиболее широко используемых видов лечения онкологических больных. Лучевая терапия может применяться как самостоятельный метод лечения, так и в сочетании с хирургией или химиотерапией, однако риск развития постлучевых осложнений достаточно высок [1]. Именно поэтому оценка токсичности является важным аспектом планирования и проведения лучевой терапии [2].

Одним из способов решения данной задачи является индивидуальный подход к подбору дозы для каждого пациента (к примеру, увеличение дозы для пациентов с низким риском или оптимизация лечения для пациентов с высоким риском осложнений [2]), что осуществляется путём создания прогностических моделей оценки риска лучевых повреждений здоровых органов и тканей на основе различных показателей уже на этапе планирования лучевой терапии.

В настоящее время широкое распространение в области анализа данных рентгенологических исследований получила радиомика — основанный на машинном обучении метод извлечения количественных характеристик из медицинских изображений (обычно описывающих форму, интенсивность и текстуру), которые можно использовать для построения прогностических моделей [3].

Радиомика широко используется для диагностики различных классов заболеваний органов грудной клетки: в области узловых образований и рака, обструктивных и рестриктивных заболеваний, а также инфильтративных заболеваний лёгких [4–7]. Кроме того, радиомика успешно применяется для прогнозирования побочных эффектов лечения, таких как пневмонит, вызванный лучевой и иммунотерапией, и дифференциации ятрогенных повреждений лёгких от рецидива опухоли [7]. Широкое распространение радиомика получила в сфере прогнозирования течения COVID-19 [8–10]. Применение радиомики может повысить эффективность диагностики, прогнозирования, лечения, последующего наблюдения и мониторинга ответа на лечение [11].

Кроме радиомики всё чаще используется понятие «дозимоики», которая представляет собой направление радиомики, применяемое к трёхмерному распределению дозы лучевой терапии с целью извлечения полезных признаков для прогнозирования результатов лучевой терапии [12–14]. В настоящее время обретает популярность комплексный подход к прогнозированию развития постлучевых повреждений на основе показателей дозимоики, радиомики и клинических данных пациентов [13].

Цель данного обзора — описать основные принципы дозимоики как направления радиомики и проанализировать исследования, посвящённые оценке возможностей применения её в клинической практике.

Критерии поиска и включения литературных источников

Систематический поиск литературы произведён в базе данных PubMed с поисковым запросом «dosiomics OR dosiomic», а также в базе данных eLibrary с поисковым запросом «дозимоика». По состоянию на апрель 2023 года опубликованы 43 зарубежных и 1 отечественная работа.

Таким образом, проанализированы 43 зарубежных исследования на тему использования дозимоики в клинической практике и 1 отечественная статья с определением термина «дозимоика» [15]. Проанализированные работы были разделены на три группы согласно их тематике, и составлена сводная таблица, описывающая 27 исследований по прогнозированию клинических исходов.

ОСНОВЫ РАДИОМИКИ И ДОЗИОМИКИ: МЕТОДЫ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ТЕКСТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗ КОМПЬЮТЕРНО-ТОМОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Радиомика — это технология, позволяющая установить взаимосвязь между многочисленными количественными характеристиками, извлечёнными из медицинских изображений органов и тканей, и клинической картиной заболевания посредством многомерного статистического анализа [16].

Показатели радиомики описывают текстурные особенности изображения тканей, что позволяет выявлять биомаркеры изображений и строить прогностические правила [17].

Этапы извлечения и анализа показателей радиомики на примере компьютерной томографии (КТ) лёгких представлены на рис. 1. После выполнения рентгенологического исследования производится сегментация области интереса — действие, которое изолирует очаг поражения от окружающей здоровой ткани. Сегментация, выполненная в трёх измерениях (3D), может предоставить больше информации, особенно для очагов, которые пространственно неоднородны и имеют большой объём. Методы сегментации включают ручные, полуавтоматические и полностью автоматические методы [16, 18]. Далее с помощью математических алгоритмов рассчитываются показатели радиомики, недоступные визуальной оценке. Метрики обычно включают статистические показатели первого порядка, а также полутоновые матрицы смежности и равномерности. На последнем этапе следуют сокращение размерности выборки, статистический анализ и отбор наиболее значимых признаков с исключением коррелирующих величин, на основе которых с помощью методов машинного обучения строится решающее правило [18].

Основные показатели радиомики

Показатели радиомики извлекаются из медицинских изображений с помощью открытой библиотеки

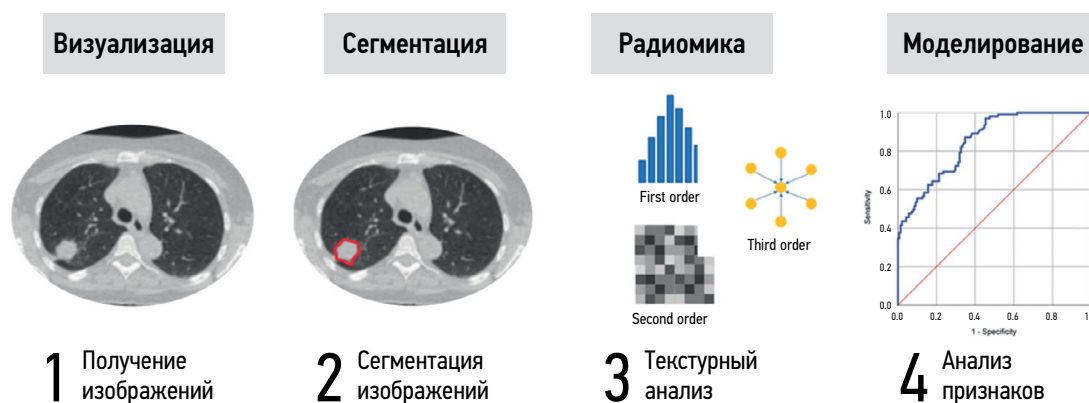


Рис. 1. Этапы извлечения и анализа показателей радиомики.

PyRadiomics. Радиомика включает две основные группы показателей: статистики первого порядка (First-order statistics) и текстурные матрицы смежности и равномерности. К ним относятся матрицы [16–18]:

- GLCM (Gray Level Co-occurrence Matrix) — матрица совпадения уровней серого;
- GLRLM (Gray Level Run Length Matrix) — матрица длин областей уровней серого;
- GLSZM (Gray Level Size Zone Matrix) — матрицы зон интенсивности уровня серого;
- NGTDM (Neighbouring Gray Tone Difference Matrix) — матрица разности соседних оттенков серого;
- GLDM (Gray Level Dependence Matrix) — матрица зависимости уровня серого.

Статистики первого порядка описывают распределение частоты уровней серого по гистограмме интенсивности пикселей в заданной области интереса без учёта пространственных взаимосвязей между пикселями [19]. Поскольку эти признаки основаны на анализе одного пикселя или одного вокселя без учёта интенсивности окружающих их областей, они называются статистиками первого порядка.

Статистические меры следующих порядков учитывают взаимное расположение вокселей в пространстве, т.е. они способны описывать особенности текстуры. Наиболее распространёнными из них являются полутонные матрицы смежности и равномерности: GLCM, GLRLM, GLSZM. Реже встречаются матрицы NGTDM и GLDM.

Матрица совпадения уровней серого (GLCM) представляет собой гистограмму уровней серого второго порядка [19]. Она фиксирует пространственные отношения пар пикселей или вокселей с предопределённой интенсивностью уровней серого в разных направлениях (по горизонтали, вертикали или диагонали для 2D-анализа и 13 направлений для 3D-анализа) и с предопределённым расстоянием между пикселями или вокселями (рис. 2; здесь и далее будет представлен принцип расчёта показателей матриц в двумерном пространстве) [20].

GLRLM — матрица длин областей уровней серого, описанная М.М. Galloway, — предоставляет информацию

о пространственном распределении векторов последовательных пикселей с одинаковым уровнем серого в одном или нескольких направлениях в двух или трёх измерениях (рис. 3) [19–22].

GLSZM — матрицы зон интенсивности уровня серого, количественно описывающие участки с одинаковым уровнем серого в изображении, состоящие из рядом расположенных вокселей. Согласно G. Thibault и соавт. [23], GLSZM основана на принципе, аналогичном GLRLM, но здесь основу для матрицы составляют подсчёты количества групп (так называемых зон) взаимосвязанных соседних пикселей или вокселей с одинаковым уровнем серого (рис. 4). Более однородная текстура приведёт к более широкой и плоской матрице. GLSZM не вычисляется для разных направлений, но может быть вычислена для разных расстояний между пикселями или вокселями, которые определяют окрестности. Характеристики GLSZM могут быть рассчитаны в двух (8 соседних пикселей) или трёх измерениях (26 соседних вокселей) [19].

NGTDM — матрица разности соседних оттенков серого. Текстурные характеристики данной матрицы отражают разницу в интенсивности между соседними вокселями [24].

GLDM — матрица зависимости уровня серого (GLDM) количественно определяет зависимости уровня серого в изображении [19, 25].

Дозиомика

Дозиомика — это новое направление в области радиомики, представляющее собой текстурный анализ планов распределения дозы облучения, используемого для планирования лучевой терапии.

Первые упоминания термина «дозииомика» в научных публикациях относятся к 2018 году, когда H.S. Gabrys и соавт. [26] применили данный метод для прогнозирования развития ксеростомии у 153 пациентов с раком головы и шеи, прошедших лучевую терапию.

Процесс получения показателей дозиомики включает два этапа.

1. При 3D-планировании лучевой терапии используется серия параллельных сканов рентгеновской КТ,

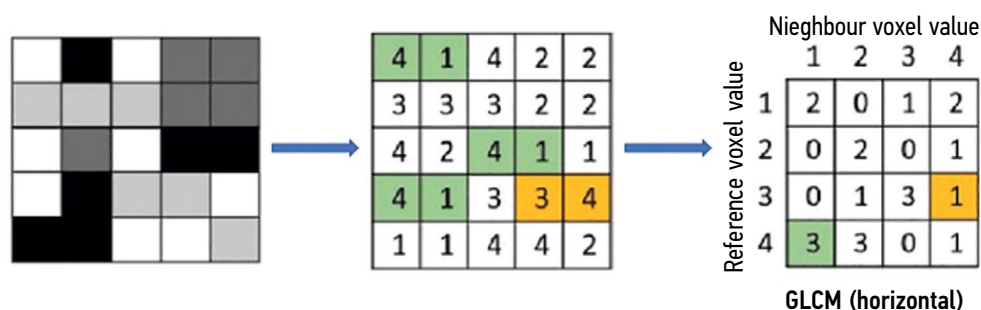


Рис. 2. Пример расчёта показателей матрицы GLCM: соседствующие пиксели с уровнем интенсивности 4 и 1 встречаются 3 раза (выделено зелёным).

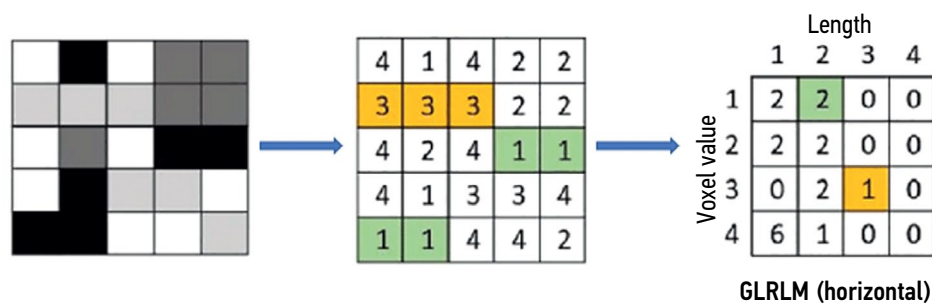


Рис. 3. Пример расчёта показателей GLRLM: три пикселя с одинаковым уровнем серого (3), располагающиеся последовательно, встречаются 1 раз (отмечено жёлтым).

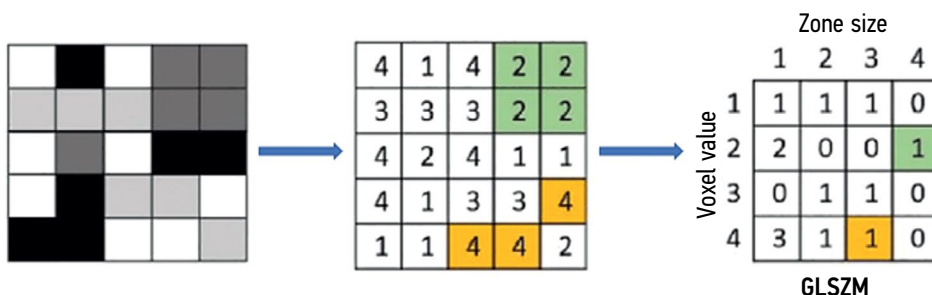


Рис. 4. Пример расчёта показателей GLSZM: зона, состоящая из 4 пикселей с уровнем серого, равным 2, встречается 1 раз (выделено зелёным).

где анатомические структуры и планируемый объём мишени определяются на каждом из сканов вручную или с помощью автоматической математической программы оконтуривания в системе планирования [27, 28].

- После получения 3D-моделей распределения дозы на них накладываются маски радиомики с помощью открытого кода, реализованного на языке программирования Python, и вычисляются количественные текстурные характеристики области интереса. Данные показатели, извлечённые из моделей распределения доз, называются показателями дозиметики, т.е. описанные выше текстурные характеристики (статистики первого порядка и матрицы смежности и равномерности).

В работе L. Rossi и соавт. [29] представлен текстурный анализ 3D-модели распределения дозы облучения на область прямой кишки. После составления карт распределения дозы облучения на область интереса накладываются маски радиомики с дальнейшим извлечением текстурных

характеристик. На рис. 5 представлены извлечённые из области интереса показатели дозиметики.

Так как изучаемый массив данных зачастую характеризуется непропорционально большим количеством входных переменных, возникает проблема снижения размерности признакового пространства. Одним из наиболее распространённых правил соотношения между количеством признаков и наблюдений является правило 20 EPV. EPV (events per variable) — это количество событий на независимую переменную, т.е. число пациентов в меньшей подгруппе, разделённое на количество входных характеристик, учитываемых при разработке модели прогнозирования [30].

На следующем этапе следует сокращение размерности признакового пространства одним из нескольких способов: например, методом главных компонент, линейным дискриминантным анализом, методом случайных лесов (функция Importance) и др. [31, 32]. Далее необходимо исключить сильно коррелирующие величины, на основе которых с помощью методов машинного

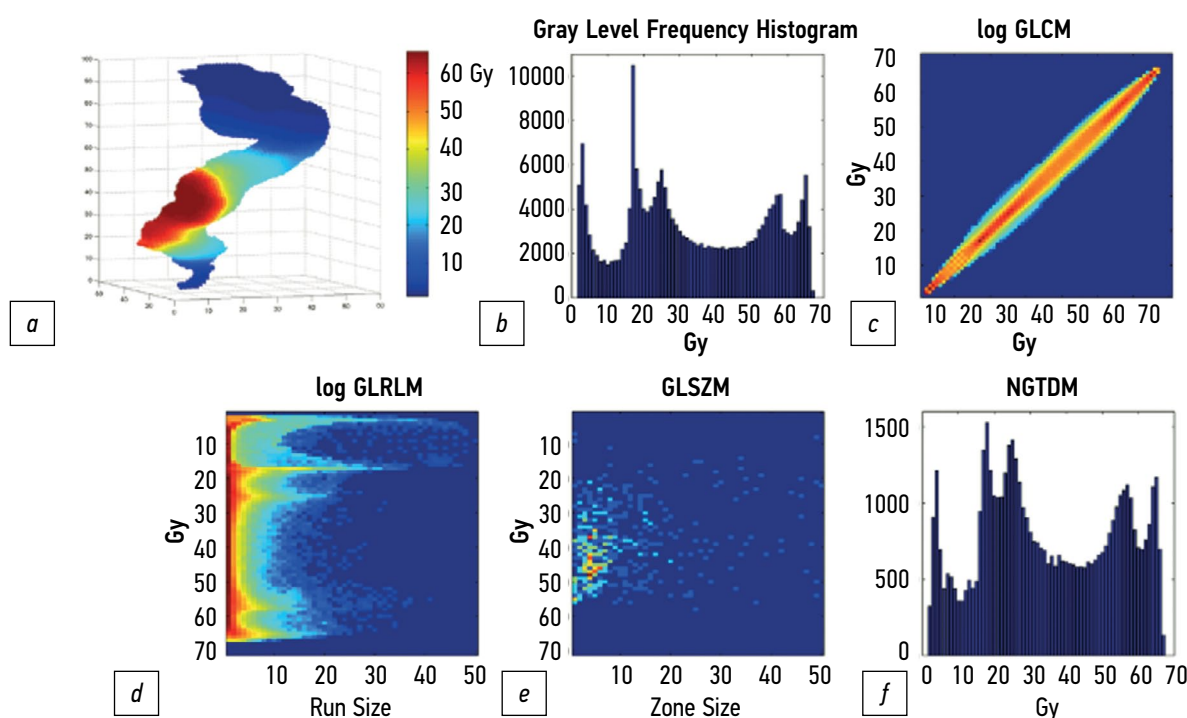


Рис. 5. Текстуальный анализ 3D-модели распределения дозы облучения на область прямой кишки: *a* — трёхмерное распределение дозы в прямой кишке; *b* — гистограмма частоты уровней серого; *c* — GLCM; *d* — GLRLM; *e* — GLSZM; *f* — NGTDM.

обучения строится решающее правило [18]. На заключительном этапе проводится многомерный статистический анализ с выбором модели прогнозирования в зависимости от поставленной в исследовании задачи. Точность моделей бинарной классификации зачастую оценивается значением площади под характеристической кривой (receiver operating characteristic, ROC) и обозначается в исследованиях как AUC (Area Under the Curve). Кривая строится на основе чувствительности (доля истинно положительных результатов) и специфичности (доля истинно отрицательных результатов). Наиболее часто метрикой оценки работы моделей выживания является индекс конкордации (C-index) — показатель ранговой корреляции между прогнозируемыми показателями риска и наблюдаемыми показателями в отдельные моменты времени, основанный на коэффициенте корреляции Кендалла.

ПРИМЕНЕНИЕ ДОЗИОМИКИ В КЛИНИЧЕСКОЙ ПРАКТИКЕ

В проанализированных зарубежных литературных источниках можно выделить три основных направления исследовательской работы: использование показателей дозиметрии для прогнозирования развития лучевых повреждений здоровых тканей; прогнозирование рецидивов новообразований и исследование стабильности и воспроизводимости дозиметрических признаков. Встречались также литературные обзоры, к примеру, работы групп авторов под руководством R. Sun [33] и X. Zhang [34], в которых дозиметрия описана как новое

направление в текстуальном анализе медицинских изображений.

Использование показателей дозиметрии в прогнозировании лучевых повреждений здоровых тканей

Общим для всех исследований данного типа является создание моделей (правил) прогнозирования случаев лучевых повреждений у онкологических пациентов. Задачей большинства авторов стало сравнение эффективности прогностических правил, основанных на различных видах данных, таких как клинические факторы, гистограммы доза–объём (dose–volume histograms, DVH), показатели радиобиологических моделей вероятности контроля опухоли (tumor control probability, TCP) и вероятности возникновения лучевых повреждений в нормальных тканях (normal tissue complication probability, NTCP), показатели дозиметрии, радиометрии и дозиметрии.

Используемые исследователями наборы показателей, их комбинации и применяемые статистические методы значительно различаются от исследования к исследованию. Чаще всего в обзоре работ встречаются исследования по прогнозированию постлучевого пневмонита у онкологических пациентов, прошедших лучевую терапию. По данным литературы, встречаемость постлучевого пневмонита значительно варьирует (от 5 до 58%), являясь при этом одним из самых распространённых осложнений после лучевой терапии рака лёгкого [1]. Наиболее масштабное исследование в данной области провели Z. Zhang и соавт. в 2023 году [35], используя данные 314 ретроспективно собранных и 35 проспективно

включённых пациентов с диагнозом рака лёгкого. Авторы построили модели на основе показателей радиомики, дозиметрии, гистограммы доза–объём (DVH) и клинических факторов. Решающее правило, построенное путём интеграции показателей радиомики, дозиметрии и клинических параметров, имело наилучшую прогностическую способность с площадью под кривой 0,855 (95% доверительный интервал 0,719–0,990) в выборке внешнего тестирования [35]. Исходя из результатов данного исследования, можно сделать вывод о более высокой точности моделей, построенных путём интеграции различных показателей.

Тот факт, что модель, включающая в себя комбинацию показателей дозиметрии и радиомики, обладает наилучшей прогностической способностью, подтверждается и другими исследователями. Подобные результаты встречаются в исследованиях В. Li и соавт. [36, 37], которые извлекли показатели из специально сегментированных функциональных областей лёгкого, и Y. Huang и соавт. [2]. Так, созданная L. Zhou и соавт. [38] модель на основе распределения эквивалентной дозы облучения, продемонстрировала высокую прогностическую способность с площадью под характеристической кривой 0,799 в тестовой выборке. Интересно, что в исследовании К.М. Kraus и соавт. [39] прогностическая модель с той же комбинацией признаков, но основанная на распределении поглощённой дозы облучения, оказалась более эффективной. Подобные различия могут быть связаны с проблемой воспроизводимости и стабильности показателей дозиметрии.

В ряде научных работ сравнивались модели на основе показателей дозиметрии и дозиметрии. Так, в исследованиях групп авторов под руководством С. Puttanawarut [40] и В. Liang [13, 41] модели на основе показателей дозиметрии оказались более эффективными, при этом, как показало исследование Т. Adachi и соавт. [42], комбинирование показателей дозиметрии и дозиметрии также являлось клинически значимым. Модели, комбинирующие показатели радиомики и дозиметрии, показали высокую точность в прогнозировании не только постлучевого пневмонита, но и других постлучевых повреждений, к примеру значительной потери веса (более 5% за 2 месяца), что подтверждают исследования С.Н. Lee [43] и Р. Han [44]. Так, Р. Han и соавт. создали в своей работе систему поддержки принятия врачебных решений, применение которой помогло врачам улучшить точность прогнозирования значительной потери веса. Результаты данных исследований демонстрируют реальную возможность внедрения решающих правил на основе дозиметрии в клиническую практику. X. Zheng и соавт. [45], создав модель прогнозирования острого лучевого эзофагита у пациентов с раком лёгкого, получили наиболее высокие значения площади под ROC-кривой (0,801), используя комбинацию радиомических, дозиметрических и клинических показателей.

На более высокую эффективность решающих правил на основе показателей дозиметрии по сравнению с дозиметрическими моделями указывают результаты

работы W. Ren и соавт. [46], в которой авторы прогнозировали развитие пострадиационного гипотиреоза у пациентов с диагнозом назофарингеальной карциномы. У группы пациентов с аналогичным диагнозом S.S. Yang и соавт. [47] прогнозировали появление лучевого повреждения височной доли. Модель на основе возраста пациента, дозиметрических и дозиметрических показателей показала наилучший результат — C-index 0,794 во внешней тестовой выборке.

Комбинирование клинических данных, показателей гистограммы доза–объём и дозиметрии в работе L. Rossi и соавт. [29] помогло улучшить эффективность прогнозирования поздних осложнений лучевой терапии мочевого пузыря и прямой кишки, таких как никтурия, ректальное кровотечение, недержание кала. Особенный интерес вызывает работа под руководством S. Monti [48], в которой авторы исследовали взаимоотношения показателей дозиметрии и геномики в развитии постлучевой лимфопении у 186 пациентов с диагнозом немелкоклеточного рака лёгкого, прошедших химиолучевую терапию. Авторы утверждают, что выявленные взаимосвязи помогут в разработке стратегий более эффективной индивидуальной лучевой терапии.

Как показывают результаты рассмотренных исследований, при включении в модели показателей дозиметрии площадь под ROC-кривой возрастала, что свидетельствует о прогностической ценности этих показателей.

Результаты описанных исследований по прогнозированию лучевых повреждений нормальных тканей представлены в табл. 1.

Прогнозирование рецидива/прогрессирования опухолей

Общие принципы проведения исследований в этой группе совпадают с работами по прогнозированию лучевых повреждений. Так, в статьях Н. Kamezawa и соавт. [49] и А. Wu и соавт. [14] по прогнозированию местного рецидива рака головы и шеи модели на основе показателей дозиметрии оказались наиболее эффективными. Подобное исследование провели В. Wang и соавт. [50], построив модели прогнозирования общей выживаемости с использованием текстурных показателей, извлечённых из КТ, совмещённой с КТ позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ-КТ) и карт распределения дозы при планировании лучевой терапии. Комбинированная модель превзошла все остальные по эффективности прогнозирования.

Подходы групп авторов под руководством Y. Murakami [12] и G. Pirrone [51] относительно прогноза рецидива рака предстательной железы несколько различались. В первом случае авторы прогнозировали биохимический рецидив, обнаружив, что эффективней всего с данной задачей справлялась модель, комбинирующая клинические и дозиметрические параметры. Во втором случае модель прогнозирования местного рецидива была основана на показателях радиомики и дозиметрии, извлечённых

Таблица 1. Результаты исследований по прогнозированию лучевых повреждений нормальных тканей

Исследование	Прогнозируемое лучевое повреждение	AUC модели на основе дозиметрики	Модель с наивысшим AUC
Zhang и соавт. [35]	Постлучевой пневмонит	0,774	R+D+C — AUC=0,855
Li и соавт. [36]	Постлучевой пневмонит	-	R+Ds — AUC=0,885
Li и соавт. [37]	Постлучевой пневмонит	0,74	R+D — AUC=0,88
Huang и соавт. [2]	Постлучевой пневмонит	0,8462	R+D — AUC=0,90
Zhou и соавт. [38]	Постлучевой пневмонит	-	R+DVH — AUC=0,805
Kraus и соавт. [39]	Постлучевой пневмонит	0,70	R+D — AUC=0,79
Puttanawarut и соавт. [40]	Постлучевой пневмонит	0,71	D — AUC=0,71
Liang и соавт. [13]	Постлучевой пневмонит	0,782	D — AUC=0,782
Liang и соавт. [41]	Постлучевой пневмонит	0,782	AUC=0,842
Adachi и соавт. [42]	Постлучевой пневмонит	0,837	Ds+D — AUC=0,846
Lee и соавт. [43]	Потеря веса	-	R+D — AUC=0,710
Han и соавт. [44]	Потеря веса	-	R+D — точность=0,73; Врачи — точность=0,54
Zheng и соавт. [45]	Острый лучевой эзофагит	0,604	C+R+D — AUC=0,801
Ren и соавт. [46]	Пострадиационный гипотиреоз	0,7	D — AUC=0,7
Yang и соавт. [47]	Лучевое повреждение височной доли	-	Возраст+DVH+D — C-index=0,794
Rossi и соавт. [29]	Ректальное кровотечение	-	C+DVH+D — AUC=0,73
	Недержание кала		C+DVH+D — AUC=0,73
	Никтурия		C+D — AUC=0,66
	Недержание мочи		C+DVH+D — AUC=0,73

Примечание. AUC (area under the curve) — площадь по характеристической кривой; R — показатели радиометрики; D — показатели дозиметрики; Ds — показатели дозиметрии; C — клинические данные пациента; DVH (dose-volume histograms) — гистограммы доза-объем.

из карт распределения биологически эффективной дозы, изображений КТ и ПЭТ-КТ.

G. Buizza и соавт. [52] и L. Morelli и соавт. [53] доказали эффективность дозиметрических моделей в прогнозировании местного рецидива хордом основания черепа и сакральной локализации соответственно. Подобные решающие правила также продемонстрировали высокие показатели индекса конкордации (C-index) в работе C. Cai и соавт. [54] по прогнозированию рецидива и метастазирования назофарингеальной карциномы. Комбинированная модель D. Wang и соавт. [55], включающая показатели дозиметрики, показала, что машинное обучение имеет потенциал в прогнозировании полной ремиссии рака прямой кишки после лучевой терапии.

S.K. Lam и соавт. [56] проанализировали компьютерные томографические и магнитно-резонансные изображения 135 пациентов с карциномой носоглотки для прогнозирования приемлемости адаптивной лучевой терапии до начала лечения. Особенностью данного исследования является впервые употребленный термин «контуромика» — метод, описывающий сложные геометрические отношения между четырьмя парами областей интереса (volume of interest, VOI). Наилучшими точностными

характеристиками обладала модель на основе радиометрики с площадью под кривой 0,927 (95% доверительный интервал 0,905–0,948).

Результаты данной группы исследований, как и в случае с прогнозом лучевых повреждений, показывают высокую точность моделей на основе показателей дозиметрики. Результаты описанных исследований по прогнозированию рецидива или прогрессирования новообразований представлены в табл. 2.

Воспроизводимость дозиметрических признаков

Статистические модели и методы, применяемые в данной группе исследований, крайне разнообразны, однако их объединяет проблема стабильности и воспроизводимости показателей дозиметрики. Данному вопросу были посвящены два исследования C. Puttanawarut и соавт. [57, 58]. В первой работе авторы изучали универсальность и применимость показателей радиометрики и дозиметрики, полученных при анализе изображений онкологических заболеваний различной локализации [57]. Для этой задачи была использована база данных, содержащая данные 101 пациента с раком пищевода и 93 пациентов с раком

Таблица 2. Результаты исследований по прогнозированию прогрессирования новообразований

Исследование	Прогнозируемая переменная	Точностная характеристика модели на основе дозиметрики	Модель с наилучшей точностной характеристикой
Kamezawa и соавт. [49]	Местный рецидив рака головы и шеи	AUC=0,81	D — AUC=0,81
Wu и соавт. [14]	Местный рецидив рака головы и шеи	C-index=0,66	D — C-index=0,66
Wang и соавт. [50]	Местный рецидив рака головы и шеи	-	R-ПЭТ+R-KT+Ds — C-index=0,873
Murakami и соавт. [12]	Рецидив рака предстательной железы	-	D+C — C-index=0,67
Pirrone и соавт. [51]	Рецидив рака предстательной железы	AUC=0,68	D — AUC=0,68
Buizza и соавт. [52]	Рецидив хордом основания черепа	C-index=0,79	R — C-index=0,80
Morelli и соавт. [53]	Рецидив хордом сакральной локализации	C-index=0,86	D — C-index=0,86
Cai и соавт. [54]	Рецидив и метастазирование назофарингеальной карциномы	C-index=0,822 для рецидива; C-index=0,786 для метастазирования	D — C-index=0,822 для рецидива; D — C-index=0,786 для метастазирования
Wang и соавт. [55]	Ремиссия рака прямой кишки	-	AUC=0,828
Lam и соавт. [56]	Оценка лучевой терапии при карциноме носоглотки	AUC=0,811	R — AUC=0,927

Примечание. AUC (area under the curve) — площадь по характеристической кривой; R — показатели радиометрики; D — показатели дозиметрики; Ds — показатели дозиметрии; C — клинические данные пациента; ПЭТ — позитронно-эмиссионная томография; КТ — компьютерная томография.

лёгких. Были разработаны четыре модели для прогнозирования развития постлучевого пневмонита в выборке пациентов с диагнозом рака пищевода и затем применены с той же целью в выборке пациентов с раком лёгкого. Модель, основанная на комбинации показателей дозиметрики и радиометрики, показала наилучший результат — AUC=0,75 и AUC=0,68 в выборках пациентов с диагнозом рака пищевода и рака лёгкого соответственно. Подобные результаты могут указывать на ограниченность применения решающих правил при изменении локализации исследуемой патологии. Суть второй работы С. Puttanawarut и соавт. заключалась в оценке устойчивости показателей дозиметрики при симулировании ошибок в планировании распределения доз [58]. Средние значения коэффициента внутриклассовой корреляции (ICC) 93 изученных показателей дозиметрики были равны 0,9, что указывало на их стабильность, при этом 5 показателей обладали значением ниже 0,75, что указывало на низкую степень их воспроизводимости. Воспроизводимость показателей дозиметрики при применении различных алгоритмов расчёта дозы была также оценена в работе Т. Adachi и соавт. [59]. Среди 6808 изученных показателей 34,8% продемонстрировали высокую воспроизводимость при применении алгоритма Acuros XB, что указывает на ограниченность применения дозиметрики при использовании различных

типов расчёта дозы. При этом в работе L. Sun и соавт. [60] большинство дозиметрических характеристик были стабильны по отношению к изменениям в расчёте дозы, но показатели гистограммы доза–объём (DVH) характеризовались меньшей вариабельностью, чем дозиметрические признаки. L. Placidi и соавт. [61] выделили четыре группы стабильных показателей дозиметрики для дальнейших исследований. В своей последующей работе авторы доказали значимость размера вокселя при извлечении дозиметрических данных [62].

Действительно, вопрос нормализации, стабильности и воспроизводимости показателей остаётся достаточно важным аспектом для реализации подобных исследований и требует дальнейшего изучения.

ОБСУЖДЕНИЕ

В приведённых исследованиях в качестве переменной для прогнозирования наиболее часто встречается постлучевой пневмонит — 11 исследований. В 9 из них для построения решающего правила использовались показатели дозиметрики без комбинации с другими признаками. Площадь под характеристической кривой (AUC), используемая в качестве точностной характеристики для таких моделей, располагалась в пределах от 0,67

до 0,84. Решающие правила на основе дозиметрии имели также высокие точностные характеристики при прогнозировании рецидивов опухолей различной локализации (С-индекс >0,66). При построении комбинированных моделей, включающих показатели дозиметрии, радиометрии, дозиметрии и клинических данных пациента, точностные характеристики возрастают, что свидетельствует о высокой прогностической способности и перспективах их применения в клинической практике для индивидуального подхода к планированию лечения пациентов.

Несомненно, на момент написания данной статьи малое количество работ и преимущественно небольшие объёмы выборки свидетельствуют о необходимости дальнейшего изучения дозиметрии и возможностей её применения. Дозиметрия может быть потенциально включена в процесс планирования лучевой терапии. Стоит отметить, что в большинстве исследований дозиметрия оказывается наиболее эффективной в комбинации с другими качественными и количественными признаками, поэтому на данный момент дозиметрию стоит рассматривать именно как направление радиометрии, позволяющее улучшить эффективность прогностических моделей. При этом необходимо указать, что значения показателей дозиметрии и радиометрии зависят от используемого программного обеспечения и могут сильно различаться от исследования к исследованию. Подобные проблемы стабильности и воспроизводимости показателей являются серьёзным препятствием на пути внедрения дозиметрии в клиническую практику и требуют дальнейшего изучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в настоящее время дозиметрия является новым и перспективным направлением радиометрии, применяемым в текстурном анализе медицинских изображений, связанных с лучевым лечением онкологических больных. Дозиметрия может способствовать развитию более персонализированного подхода к планированию лучевой терапии, прогнозированию лучевых повреждений нормальных тканей и диагностике рецидивов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Arroyo-Hernández M., Maldonado F., Lozano-Ruiz F., et al. Radiation-induced lung injury: Current evidence // BMC Pulm Med. 2021. Vol. 21, N 1. P. 1–12. doi: 10.1186/s12890-020-01376-4
2. Huang Y., Feng A., Lin Y., et al. Radiation pneumonitis prediction after stereotactic body radiation therapy based on 3D dose distribution: Dosimetrics and/or deep learning-based radiomics features // Radiat Oncol. 2022. Vol. 17, N 1. P. 188. doi: 10.1186/s13014-022-02154-8
3. Morelli L., Parrella G., Molinelli S., et al. A dosimetrics analysis based on linear energy transfer and biological dose maps to predict local recurrence in sacral chordomas after carbon-ion radiotherapy // Cancers. 2023. Vol. 15, N 1. P. 33. doi: 10.3390/cancers15010033

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Вклад авторов. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение поисково-аналитической работы и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распределён следующим образом: В.А. Солодкий — общая концепция и утверждение окончательного варианта статьи; Н.В. Нуднов — дизайн и диагностические аспекты исследования; М.Е. Иванников — сбор и анализ данных; Э.С.-А. Шахвалиева — написание текста рукописи, создание иллюстраций; В.М. Сотников — радиотерапевтические аспекты исследования, редактирование текста рукописи; А.Ю. Смыслов — дозиметрические и физические аспекты исследования, редактирование текста рукописи.

ADDITIONAL INFORMATION

Funding source. This article was not supported by any external sources of funding.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work. The major contributions were distributed as follows: V.A. Solodkiy — general concept and approval of the final version of the article; N.V. Nudnov — design and diagnostic aspects of the study; M.E. Ivannikov — data collection and analysis; E.S.-A. Shakhvalieva — writing the manuscript text, preparation of illustrations; V.M. Sotnikov — radiotherapeutic aspects of the study, editing of the manuscript; A.Yu. Smyslov — dosimetric and physical aspects of the study, manuscript editing.

4. Ryan S.M., Fingerlin T.E., Mroz M., et al. Radiomic measures from chest high-resolution computed tomography associated with lung function in sarcoidosis // Eur Respir J. 2021. Vol. 54, N 2. P. 1900371. doi: 10.1183/13993003.00371-2019
5. Hooda R., Mittal A., Sofat S. Segmentation of lung fields from chest radiographs: A radiomic feature-based approach // Biomed Eng Lett. 2019. Vol. 9, N 1. P. 109–117. doi: 10.1007/s13534-018-0086-z
6. Zhang B., Ni-Jia-Ti M.Y., Yan R., et al. CT-based radiomics for predicting the rapid progression of coronavirus disease 2019 (COVID-19) pneumonia lesions // Br J Radiol. 2021. Vol. 94, N 1122. P. 20201007. doi: 10.1259/bjr.20201007

7. Avanzo M., Stancanella J., Pirrone G., et al. Radiomics and deep learning in lung cancer // *Strahlenther Onkol.* 2020. Vol. 196, N 10. P. 879–887. doi: 10.1007/s00066-020-01625-9
8. Ji D., Zhang D., Xu J., et al. Prediction for progression risk in patients with COVID-19 pneumonia: The CALL score // *Clin Infect Dis.* 2020. Vol. 71, N 6. P. 1393–1399. doi: 10.1093/cid/ciaa414
9. Chen H., Zeng M., Wang X., et al. A CT-based radiomics nomogram for predicting prognosis of coronavirus disease 2019 (COVID-19) radiomics nomogram predicting COVID-19 // *Br J Radiol.* 2021. Vol. 94, N 1117. P. 20200634. doi: 10.1259/bjr.20200634
10. Wang D., Huang C., Bao S., et al. Study on the prognosis predictive model of COVID-19 patients based on CT radiomics // *Sci Reports.* 2021. Vol. 11, N 1. P. 11591. doi:10.1038/s41598-021-90991-0
11. Frix A.N., Cousin F., Refaee T., et al. Radiomics in lung diseases imaging: State of the art for clinicians // *J Personal Med.* 2021. Vol. 11, N 7. P. 602. doi: 10.3390/jpm11070602
12. Murakami Y., Soyano T., Kozuka T., et al. Dose-Based radiomic analysis (dosiomics) for intensity modulated radiation therapy in patients with prostate cancer: Correlation between planned dose distribution and biochemical failure // *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 2022. Vol. 112, N 1. P. 247–259. doi: 10.1016/j.ijrobp.2021.07.1714
13. Liang B., Yan H., Tian Y., et al. Dosiomics: Extracting 3D spatial features from dose distribution to predict incidence of radiation pneumonitis // *Front Oncol.* 2019. N 9. P. 269. doi: 10.3389/fonc.2019.00269
14. Wu A., Li Y., Qi M., et al. Dosiomics improves prediction of locoregional recurrence for intensity modulated radiotherapy treated head and neck cancer cases // *Oral Oncol.* 2020. N 104. P. 104625. doi: 10.1016/j.oraloncology.2020.104625
15. Андреев Д.А., Завьялов А.А. Критерии оценки качества лучевой терапии на примере рака предстательной железы (краткий обзор зарубежной литературы) // *Проблемы социальной гигиены, здравоохранения и истории медицины.* 2021. Т. 29, № S2. С. 1292–1297. doi: 10.32687/0869-866X-2021-29-s2-1292-1297
16. Chen Q., Xia T., Zhang M., et al. Radiomics in stroke neuroimaging: Techniques, applications, and challenges // *Aging Dis.* 2021. Vol. 12, N 1. P. 143–154. doi: 10.14336/AD.2020.0421
17. Mayerhoefer M.E., Materka A., Langs G., et al. Introduction to radiomics // *J Nucl Med.* 2020. Vol. 61, N 4. P. 488–495. doi: 10.2967/jnumed.118.222893
18. Van Timmeren J.E., Cester D., Tanadini-Lang S., et al. Radiomics in medical imaging: “How-to” guide and critical reflection // *Insights Imaging.* 2020. Vol. 11, N 1. P. 91. doi: 10.1186/s13244-020-00887-2
19. Radiomic Features: pyradiomics v3.0.1.post15+g2791e23 documentation [интернет]. Режим доступа: <https://pyradiomics.readthedocs.io/en/latest/features.html#>. Дата обращения: 21.04.2023.
20. Al-Areqi F., Konyar M.Z. Effectiveness evaluation of different feature extraction methods for classification of COVID-19 from computed tomography images: A high accuracy classification study // *Biomed Signal Process Control.* 2022. N 76. P. 103662. doi: 10.1016/j.bspc.2022.103662
21. Zwanenburg A., Vallières M., Abdalah M.A., et al. The image biomarker standardization initiative: Standardized quantitative radiomics for high-throughput image-based phenotyping // *Radiology.* 2020. Vol. 295, N 2. P. 328–338. doi: 10.1148/radiol.2020191145
22. Galloway M.M. Texture analysis using gray level run lengths // *Comput Graph Image Process.* 1975. Vol. 4, N 2. P. 172–179. doi:10.1016/s0146-664x(75)80008-6
23. Thibault G., Angulo J., Meyer F. Advanced statistical matrices for texture characterization: application to cell classification // *IEEE Trans Biomed Eng.* 2014. Vol. 61, N 3. P. 630–637. doi: 10.1109/TBME.2013.2284600
24. Chen S., Harmon S., Perk T., et al. Using neighborhood gray tone difference matrix texture features on dual time point PET/CT images to differentiate malignant from benign FDG-avid solitary pulmonary nodules // *Cancer Imaging.* 2019. Vol. 19, N 1. P. 56. doi: 10.1186/s40644-019-0243-3
25. He J., Ren J., Niu G., et al. Multiparametric MR radiomics in brain glioma: Models comparison to predict biomarker status // *BMC Med Imaging.* 2022. Vol. 22, N 1. P. 137. doi: 10.1186/s12880-022-00865-8
26. Gabrys H.S., Buettner F., Sterzing F., et al. Design and selection of machine learning methods using radiomics and dosiomics for normal tissue complication probability modeling of xerostomia // *Front Oncol.* 2018. N 8. P. 35. doi: 10.3389/fonc.2018.00035
27. Леденев В.В., Нуднов Н.В., Сотников В.М., и др. Результаты количественной оценки постлучевых изменений в легких у онкологических пациентов, полученные с помощью новой методики анализа динамически выполненных РКТ-исследований органов грудной клетки // *Вестник рентгенологии и радиологии.* 2020. Т. 101, № 1. С. 30–38. doi: 10.20862/0042-4676-2020-101-1-30-38
28. Леденев В.В., Солодкий В.А., Нуднов Н.В., и др. Количественные характеристики лучевого повреждения легочной ткани у онкологических пациентов при лучевой терапии на основании данных РКТ // *Медицинская визуализация.* 2022. Т. 26, № 4. С. 60–74. doi: 10.24835/1607-0763-1182
29. Rossi L., Bijman R., Schilleman W., et al. Texture analysis of 3D dose distributions for predictive modelling of toxicity rates in radiotherapy // *Radiother Oncol.* 2018. Vol. 129, N 3. P. 548–553. doi: 10.1016/j.radonc.2018.07.027
30. Liu J., Guo W., Zeng P., et al. Vertebral MRI-based radiomics model to differentiate multiple myeloma from metastases: Influence of features number on logistic regression model performance // *Eur Radiol.* 2021. Vol. 32, N 1. P. 572–581. doi: 10.1007/s00330-021-08150-y
31. Dhir C.S., Lee S.Y. Discriminant independent component analysis // *IEEE Trans Neural Netw.* 2011. Vol. 22, N 6. P. 845–857. doi: 10.1109/TNN.2011.2122266
32. Random Forest Feature Importance Computed in 3 Ways with Python / MLJAR [интернет]. Режим доступа: <https://mljar.com/blog/feature-importance-in-random-forest/>. Дата обращения: 21.04.2023.
33. Sun R., Lerousseau M., Henry T., et al. Intelligence artificielle en radiothérapie: Radiomique, pathomique, et prédiction de la survie et de la réponse aux traitements // *Cancer Radiothér.* 2021. Vol. 25, N 6–7. P. 630–637. doi: 10.1016/j.canrad.2021.06.027
34. Zhang X., Zhang Y., Zhang G., et al. Deep learning with radiomics for disease diagnosis and treatment: Challenges and potential // *Front Oncol.* 2022. N 12. P. 276. doi: 10.3389/fonc.2022.773840
35. Zhang Z., Wang Z., Yan M., et al. Radiomics and dosiomics signature from whole lung predicts radiation pneumonitis: A model development study with prospective external validation and decision-curve analysis // *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 2023. Vol. 115, N 3. P. 746–758. doi: 10.1016/j.ijrobp.2022.08.047
36. Li B., Ren G., Guo W., et al. Function-Wise Dual-Omics analysis for radiation pneumonitis prediction in lung cancer patients // *Front Pharmacol.* 2022. N 13. P. 3445. doi: 10.3389/fphar.2022.971849

37. Li B., Zheng X., Zhang J., et al. Lung subregion partitioning by incremental dose intervals improves omics-based prediction for acute radiation pneumonitis in non-small-cell lung cancer patients // *Cancers (Basel)*. 2022. Vol. 14, N 19. P. 4889. doi: 10.3390/cancers14194889
38. Zhou L., Wen Y., Zhang G., et al. Machine learning-based multiomics prediction model for radiation pneumonitis // *J Oncol*. 2023. Vol. 2023. P. 5328927. doi: 10.1155/2023/5328927
39. Kraus K.M., Oreshko M., Bernhardt D., et al. Dosiomics and radiomics to predict pneumonitis after thoracic stereotactic body radiotherapy and immune checkpoint inhibition // *Front Oncol*. 2023. N 13. P. 1056. doi: 10.3389/fonc.2023.1124592
40. Puttanawarut C., Sirirutbunkajorn N., Khachonkham S., et al. Biological dosiomic features for the prediction of radiation pneumonitis in esophageal cancer patients // *Radiat Oncol*. 2021. Vol. 16, N 1. P. 220. doi: 10.1186/s13014-021-01950-y
41. Liang B., Tian Y., Chen X., et al. Prediction of radiation pneumonitis with dose distribution: A convolutional neural network (CNN) based model // *Front Oncol*. 2020. N 9. P. 1500. doi: 10.3389/fonc.2019.01500
42. Adachi T., Nakamura M., Shintani T., et al. Multi-institutional dose-segmented dosiomic analysis for predicting radiation pneumonitis after lung stereotactic body radiation therapy // *Med Phys*. 2021. Vol. 48, N 4. P. 1781–1791. doi: 10.1002/mp.14769
43. Lee S.H., Han P., Hales R.K., et al. Multi-view radiomics and dosiomics analysis with machine learning for predicting acute-phase weight loss in lung cancer patients treated with radiotherapy // *Phys Med Biol*. 2020. Vol. 65, N 19. P. 195015. doi: 10.1088/1361-6560/ab8531
44. Han P., Lee S.H., Noro K., et al. Improving early identification of significant weight loss using clinical decision support system in lung cancer radiation therapy // *JCO Clin Cancer Inform*. 2021. N 5. P. 944–952. doi: 10.1200/CCI.20.00189
45. Zheng X., Guo W., Wang Y., et al. Multi-omics to predict acute radiation esophagitis in patients with lung cancer treated with intensity-modulated radiation therapy // *Eur J Med Res*. 2023. Vol. 28, N 1. P. 126. doi: 10.1186/s40001-023-01041-6
46. Ren W., Liang B., Sun C., et al. Dosiomics-based prediction of radiation-induced hypothyroidism in nasopharyngeal carcinoma patients // *Phys Medica*. 2021. Vol. 89. P. 219–225. doi: 10.1016/j.ejmp.2021.08.009
47. Yang S.S., OuYang P.Y., Guo J.G., et al. Dosiomics risk model for predicting radiation induced temporal lobe injury and guiding individual intensity-modulated radiation therapy // *Int J Radiat Oncol Biol Phys*. 2023. Vol. 115, N 5. P. 1291–1300. doi: 10.1016/j.ijrobp.2022.11.036
48. Monti S., Xu T., Liao Z., et al. On the interplay between dosiomics and genomics in radiation-induced lymphopenia of lung cancer patients // *Radiother Oncol*. 2022. N 167. P. 219–225. doi: 10.1016/j.radonc.2021.12.038
49. Kamezawa H., Arimura H. Recurrence prediction with local binary pattern-based dosiomics in patients with head and neck squamous cell carcinoma // *Phys Eng Sci Med*. 2022. Vol. 46, N 1. P. 99–107. doi: 10.1007/s13246-022-01201-8
50. Wang B., Liu J., Zhang X., et al. Prognostic value of 18F-FDG PET/CT-based radiomics combining dosiomics and dose volume histogram for head and neck cancer // *EJNMMI Res*. 2023. Vol. 13, N 1. P. 14. doi: 10.1186/s13550-023-00959-6
51. Pirrone G., Matrone F., Chiovati P., et al. Predicting local failure after partial prostate re-irradiation using a dosiomic-based machine learning model // *J Pers Med*. 2022. Vol. 12, N 9. P. 1491. doi: 10.3390/jpm12091491
52. Buizza G., Paganelli C., D'Ippolito E., et al. Radiomics and dosiomics for predicting local control after carbon-ion radiotherapy in skull-base chordoma // *Cancers*. 2021. Vol. 13, N 2. P. 339. doi: 10.3390/cancers13020339
53. Morelli L., Parrella G., Molinelli S., et al. A Dosiomics analysis based on linear energy transfer and biological dose maps to predict local recurrence in sacral chordomas after carbon-ion radiotherapy // *Cancers (Basel)*. 2023. Vol. 15, N 1. P. 33. doi: 10.3390/cancers15010033
54. Cai C., Lv W., Chi F., et al. Prognostic generalization of multi-level CT-dose fusion dosiomics from primary tumor and lymph node in nasopharyngeal carcinoma // *Med Phys*. 2023. Vol. 50, N 2. P. 922–934. doi: 10.1002/mp.16044
55. Wang D., Lee S.H., Geng H., et al. Interpretable machine learning for predicting pathologic complete response in patients treated with chemoradiation therapy for rectal adenocarcinoma // *Front Artif Intell*. 2022. N 5. P. 1059033. doi: 10.3389/frai.2022.1059033
56. Lam S.K., Zhang Y., Zhang J., et al. Multi-Organ omics-based prediction for adaptive radiation therapy eligibility in nasopharyngeal carcinoma patients undergoing concurrent chemoradiotherapy // *Front Oncol*. 2022. N 11. P. 792024. doi: 10.3389/fonc.2021.792024
57. Puttanawarut C., Sirirutbunkajorn N., Tawong N., et al. Radiomic and dosiomic features for the prediction of radiation pneumonitis across esophageal cancer and lung cancer // *Front Oncol*. 2022. N 12. P. 768152. doi: 10.3389/fonc.2022.768152
58. Puttanawarut C., Sirirutbunkajorn N., Tawong N., et al. Impact of interfractional error on dosiomic features // *Front Oncol*. 2022. N 12. P. 726896. doi: 10.3389/fonc.2022.726896
59. Adachi T., Nakamura M., Kakino R., et al. Dosiomic feature comparison between dose-calculation algorithms used for lung stereotactic body radiation therapy // *Radiol Phys Technol*. 2022. Vol. 15, N 1. P. 63–71. doi: 10.1007/s12194-022-00651-9
60. Sun L., Smith W., Kirkby C. Stability of dosiomic features against variations in dose calculation: An analysis based on a cohort of prostate external beam radiotherapy patients // *J Appl Clin Med Phys*. 2023. Vol. 24, N 5. P. e13904. doi: 10.1002/acm2.13904
61. Placidi L., Gioscio E., Garibaldi C., et al. A multicentre evaluation of dosiomics features reproducibility, stability and sensitivity // *Cancers (Basel)*. 2021. Vol. 13, N 15. P. 3835. doi: 10.3390/cancers13153835
62. Placidi L., Cusumano D., Lenkiewicz J., et al. On dose cube pixel spacing pre-processing for features extraction stability in dosiomic studies // *Phys Medica*. 2021. N 90. P. 108–114. doi: 10.1016/j.ejmp.2021.09.010

REFERENCES

1. Arroyo-Hernández M, Maldonado F, Lozano-Ruiz F, et al. Radiation-induced lung injury: Current evidence. *BMC Pulm Med*. 2021;21(1):9. doi: 10.1186/s12890-020-01376-4
2. Huang Y, Feng A, Lin Y, et al. Radiation pneumonitis prediction after stereotactic body radiation therapy based on 3D dose distribution: Dosiomics and/or deep learning-

- based radiomics features. *Radiat Oncol.* 2022;17(1):188. doi: 10.1186/s13014-022-02154-8
3. Morelli L, Parrella G, Molinelli S, et al. A dosiomics analysis based on linear energy transfer and biological dose maps to predict local recurrence in sacral chordomas after carbon-ion radiotherapy. *Cancers (Basel).* 2022;15(1):33. doi: 10.3390/cancers15010033
 4. Ryan SM, Fingerlin TE, Mroz M, et al. Radiomic measures from chest high-resolution computed tomography associated with lung function in sarcoidosis. *Eur Respir J.* 2019;54(2):1900371. doi: 10.1183/13993003.00371-2019
 5. Hooda R, Mittal A, Sofat S. Segmentation of lung fields from chest radiographs: A radiomic feature-based approach. *Biomed Eng Lett.* 2018;9(1):109–117. doi: 10.1007/s13534-018-0086-z
 6. Zhang B, Ni-Jia-Ti MY, Yan R, et al. CT-based radiomics for predicting the rapid progression of coronavirus disease 2019 (COVID-19) pneumonia lesions. *Br J Radiol.* 2021;94(1122):20201007. doi: 10.1259/bjr.20201007
 7. Avanzo M, Stancanella J, Pirrone G, et al. Radiomics and deep learning in lung cancer. *Strahlenther Onkol.* 2020;196(10):879–887. doi: 10.1007/s00066-020-01625-9
 8. Ji D, Zhang D, Xu J, et al. Prediction for progression risk in patients with COVID-19 pneumonia: The CALL score. *Clin Infect Dis.* 2020;71(6):1393–1399. doi: 10.1093/cid/ciaa414
 9. Chen H, Zeng M, Wang X, et al. A CT-based radiomics nomogram for predicting prognosis of coronavirus disease 2019 (COVID-19) radiomics nomogram predicting COVID-19. *Br J Radiol.* 2021;94(1117):20200634. doi: 10.1259/bjr.20200634
 10. Wang D, Huang C, Bao S, et al. Study on the prognosis predictive model of COVID-19 patients based on CT radiomics. *Sci Rep.* 2021;11(1):11591. doi: 10.1038/s41598-021-90991-0
 11. Frix AN, Cousin F, Refaee T, et al. Radiomics in lung diseases imaging: State of the Art for Clinicians. *J Pers Med.* 2021;11(7):602. doi: 10.3390/jpm11070602
 12. Murakami Y, Soyano T, Kozuka T, et al. Dose-Based radiomic analysis (dosiomics) for intensity modulated radiation therapy in patients with prostate cancer: Correlation between planned dose distribution and biochemical failure. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 2022;112(1):247–259. doi: 10.1016/j.ijrobp.2021.07.1714
 13. Liang B, Yan H, Tian Y, et al. Dosiomics: Extracting 3D spatial features from dose distribution to predict incidence of radiation pneumonitis. *Front Oncol.* 2019;(9):269. doi: 10.3389/fonc.2019.00269
 14. Wu A, Li Y, Qi M, et al. Dosiomics improves prediction of locoregional recurrence for intensity modulated radiotherapy treated head and neck cancer cases. *Oral Oncol.* 2020;(104):104625. doi: 10.1016/j.oraloncology.2020.104625
 15. Andreev DA, Zavyalov AA. The quality indicators to assess the prostate cancer radiotherapy performance (brief review). *Problems Social Hygiene Public Health History Med.* 2021;29(S2):1292–1297. (In Russ). doi: 10.32687/0869-866X-2021-29-s2-1292-1297
 16. Chen Q, Xia T, Zhang M, et al. Radiomics in stroke neuroimaging: Techniques, applications, and challenges. *Aging Dis.* 2021;12(1):143–154. doi: 10.14336/AD.2020.0421
 17. Mayerhoefer ME, Materka A, Langs G, et al. Introduction to radiomics. *J Nucl Med.* 2020;61(4):488–495. doi: 10.2967/jnumed.118.222893
 18. Van Timmeren JE, Cester D, Tanadini-Lang S, et al. Radiomics in medical imaging: "How-to" guide and critical reflection. *Insights Imaging.* 2020;11(1):91. doi: 10.1186/s13244-020-00887-2
 19. Radiomic Features — pyradiomics v3.0.1.post15+g2791e23 documentation [Internet]. Available from: <https://pyradiomics.readthedocs.io/en/latest/features.html#>. Accessed: 21.04.2023.
 20. Al-Areqi F, Konyar MZ. Effectiveness evaluation of different feature extraction methods for classification of COVID-19 from computed tomography images: A high accuracy classification study. *Biomed Signal Process Control.* 2022;(76):103662. doi: 10.1016/j.bspc.2022.103662
 21. Zwanenburg A, Vallières M, Abdalah MA, et al. The image biomarker standardization initiative: Standardized quantitative radiomics for high-throughput image-based phenotyping. *Radiology.* 2020;295(2):328–338. doi: 10.1148/radiol.2020191145
 22. Galloway MM. Texture analysis using gray level run lengths. *Comput Graph Image Process.* 1975;4(2):172–179. doi: 10.1016/S0146-664X(75)80008-6
 23. Thibault G, Angulo J, Meyer F. Advanced statistical matrices for texture characterization: Application to cell classification. *IEEE Trans Biomed Eng.* 2014;61(3):630–637. doi: 10.1109/TBME.2013.2284600
 24. Chen S, Harmon S, Perk T, et al. Using neighborhood gray tone difference matrix texture features on dual time point PET/CT images to differentiate malignant from benign FDG-avid solitary pulmonary nodules. *Cancer Imaging.* 2019;19(1):56. doi: 10.1186/s40644-019-0243-3
 25. He J, Ren J, Niu G, et al. Multiparametric MR radiomics in brain glioma: Models comparison to predict biomarker status. *BMC Med Imaging.* 2022;22(1):137. doi: 10.1186/s12880-022-00865-8
 26. Gabrys HS, Buettner F, Sterzing F, et al. Design and selection of machine learning methods using radiomics and dosiomics for normal tissue complication probability modeling of xerostomia. *Front Oncol.* 2018;8:35. doi: 10.3389/fonc.2018.00035
 27. Ledenev VV, Nudnov NV, Sotnikov VM, et al. The results of quantitative evaluation of postradiation changes in lung cancer patients, which were obtained using a new procedure for analysis of dynamic X-ray computed tomography imaging of thoracic organs. *J Radiol Nuclear Med.* 2020;101(1):30–38. (In Russ). doi: 10.20862/0042-4676-2020-101-1-30-38
 28. Ledenev VV, Solodkiy VA, Nudnov NV, et al. Quantitative characteristics of radiation-induced lung damage in oncological patients during radiotherapy based on RCT data. *Med Visual.* 2022;26(4):60–74. (In Russ). doi: 10.24835/1607-0763-1182
 29. Rossi L, Bijman R, Schillema W, et al. Texture analysis of 3D dose distributions for predictive modelling of toxicity rates in radiotherapy. *Radiother Oncol.* 2018;129(3):548–553. doi: 10.1016/j.radonc.2018.07.027
 30. Liu J, Guo W, Zeng P, et al. Vertebral MRI-based radiomics model to differentiate multiple myeloma from metastases: Influence of features number on logistic regression model performance. *Eur Radiol.* 2022;32(1):572–581. doi: 10.1007/s00330-021-08150-y
 31. Dhir CS, Lee SY. Discriminant independent component analysis. *IEEE Trans Neural Netw.* 2011;22(6):845–857. doi: 10.1109/TNN.2011.2122266
 32. Random Forest Feature Importance Computed in 3 Ways with Python | MLJAR [Internet]. Available from: <https://mljar.com/blog/feature-importance-in-random-forest/>. Accessed: 21.04.2023.
 33. Sun R, Lerousseau M, Henry T, et al. Intelligence artificielle en radiothérapie: Radiomique, pathomique, et prédiction de la survie et de la réponse aux traitements. *Cancer Radiother.* 2021;25(6-7):630–637. doi: 10.1016/j.canrad.2021.06.027

34. Zhang X, Zhang Y, Zhang G, et al. Deep learning with radiomics for disease diagnosis and treatment: challenges and potential. *Front Oncol.* 2022;(12):773840. doi: 10.3389/fonc.2022.773840
35. Zhang Z, Wang Z, Yan M, et al. Radiomics and dosiomics signature from whole lung predicts radiation pneumonitis: A model development study with prospective external validation and decision-curve analysis. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 2023;115(3):746–758. doi: 10.1016/j.ijrobp.2022.08.047
36. Li B, Ren G, Guo W, et al. Function-Wise dual-omics analysis for radiation pneumonitis prediction in lung cancer patients. *Front Pharmacol.* 2022;(13):971849. doi: 10.3389/fphar.2022.971849
37. Li B, Zheng X, Zhang J, et al. Lung subregion partitioning by incremental dose intervals improves omics-based prediction for acute radiation pneumonitis in non-small-cell lung cancer patients. *Cancers (Basel).* 2022;14(19):4889. doi: 10.3390/cancers14194889
38. Zhou L, Wen Y, Zhang G, et al. Machine learning-based multiomics prediction model for radiation pneumonitis. *J Oncol.* 2023;2023:5328927. doi: 10.1155/2023/5328927
39. Kraus KM, Oreshko M, Bernhardt D, et al. Dosiomics and radiomics to predict pneumonitis after thoracic stereotactic body radiotherapy and immune checkpoint inhibition. *Front Oncol.* 2023;(13):1124592. doi: 10.3389/fonc.2023.1124592
40. Puttanawarut C, Sirirutbunkajorn N, Khachonkham S, et al. Biological dosiomic features for the prediction of radiation pneumonitis in esophageal cancer patients. *Radiat Oncol.* 2021;16(1):220. doi: 10.1186/s13014-021-01950-y
41. Liang B, Tian Y, Chen X, et al. Prediction of radiation pneumonitis with dose distribution: A convolutional neural network (CNN) based model. *Front Oncol.* 2020;(9):1500. doi: 10.3389/fonc.2019.01500
42. Adachi T, Nakamura M, Shintani T, et al. Multi-institutional dose-segmented dosiomic analysis for predicting radiation pneumonitis after lung stereotactic body radiation therapy. *Med Phys.* 2021;48(4):1781–1791. doi: 10.1002/mp.14769
43. Lee SH, Han P, Hales RK, et al. Multi-view radiomics and dosiomics analysis with machine learning for predicting acute-phase weight loss in lung cancer patients treated with radiotherapy. *Phys Med Biol.* 2020;65(19):195015. doi: 10.1088/1361-6560/ab8531
44. Han P, Lee SH, Noro K, et al. Improving early identification of significant weight loss using clinical decision support system in lung cancer radiation therapy. *JCO Clin Cancer Inform.* 2021;(5):944–952. doi: 10.1200/CC1.20.00189
45. Zheng X, Guo W, Wang Y, et al. Multi-omics to predict acute radiation esophagitis in patients with lung cancer treated with intensity-modulated radiation therapy. *Eur J Med Res.* 2023;28(1):126. doi: 10.1186/s40001-023-01041-6
46. Ren W, Liang B, Sun C, et al. Dosiomics-based prediction of radiation-induced hypothyroidism in nasopharyngeal carcinoma patients. *Phys Med.* 2021;(89):219–225. doi: 10.1016/j.ejmp.2021.08.009
47. Yang SS, OuYang PY, Guo JG, et al. Dosiomics risk model for predicting radiation induced temporal lobe injury and guiding individual intensity-modulated radiation therapy. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 2023;115(5):1291–1300. doi: 10.1016/j.ijrobp.2022.11.036
48. Monti S, Xu T, Liao Z, et al. On the interplay between dosiomics and genomics in radiation-induced lymphopenia of lung cancer patients. *Radiother Oncol.* 2022;(167):219–225. doi: 10.1016/j.radonc.2021.12.038
49. Kamezawa H, Arimura H. Recurrence prediction with local binary pattern-based dosiomics in patients with head and neck squamous cell carcinoma. *Phys Eng Sci Med.* 2023;46(1):99–107. doi: 10.1007/s13246-022-01201-8
50. Wang B, Liu J, Zhang X, et al. Prognostic value of 18F-FDG PET/CT-based radiomics combining dosiomics and dose volume histogram for head and neck cancer. *EJNMMI Res.* 2023;13(1):14. doi: 10.1186/s13550-023-00959-6
51. Pirrone G, Matrone F, Chiovati P, et al. Predicting local failure after partial prostate re-irradiation using a dosiomic-based machine learning model. *J Pers Med.* 2022;12(9):1491. doi: 10.3390/jpm12091491
52. Buizza G, Paganelli C, D'Ippolito E, et al. Radiomics and dosiomics for predicting local control after carbon-ion radiotherapy in skull-base chordoma. *Cancers (Basel).* 2021;13(2):339. doi: 10.3390/cancers13020339
53. Morelli L, Parrella G, Molinelli S, et al. A dosiomics analysis based on linear energy transfer and biological dose maps to predict local recurrence in sacral chordomas after carbon-ion radiotherapy. *Cancers (Basel).* 2022;15(1):33. doi: 10.3390/cancers15010033
54. Cai C, Lv W, Chi F, et al. Prognostic generalization of multi-level CT-dose fusion dosiomics from primary tumor and lymph node in nasopharyngeal carcinoma. *Med Phys.* 2023;50(2):922–934. doi: 10.1002/mp.16044
55. Wang D, Lee SH, Geng H, et al. Interpretable machine learning for predicting pathologic complete response in patients treated with chemoradiation therapy for rectal adenocarcinoma. *Front Artif Intell.* 2022;(5):1059033. doi: 10.3389/frai.2022.1059033
56. Lam SK, Zhang Y, Zhang J, et al. Multi-Organ omics-based prediction for adaptive radiation therapy eligibility in nasopharyngeal carcinoma patients undergoing concurrent chemoradiotherapy. *Front Oncol.* 2022;(11):792024. doi: 10.3389/fonc.2021.792024
57. Puttanawarut C, Sirirutbunkajorn N, Tawong N, et al. Radiomic and dosiomic features for the prediction of radiation pneumonitis across esophageal cancer and lung cancer. *Front Oncol.* 2022;(12):768152. doi: 10.3389/fonc.2022.768152
58. Puttanawarut C, Sirirutbunkajorn N, Tawong N, et al. Impact of interfractional error on dosiomic features. *Front Oncol.* 2022;(12):726896. doi: 10.3389/fonc.2022.726896
59. Adachi T, Nakamura M, Kakino R, et al. Dosiomic feature comparison between dose-calculation algorithms used for lung stereotactic body radiation therapy. *Radiol Phys Technol.* 2022;15(1):63–71. doi: 10.1007/s12194-022-00651-9
60. Sun L, Smith W, Kirkby C. Stability of dosiomic features against variations in dose calculation: An analysis based on a cohort of prostate external beam radiotherapy patients. *J Appl Clin Med Phys.* 2023;24(5):e13904. doi: 10.1002/acm2.13904
61. Placidi L, Gioscio E, Garibaldi C, et al. A Multicentre evaluation of dosiomics features reproducibility, stability and sensitivity. *Cancers (Basel).* 2021;13(15):3835. doi: 10.3390/cancers13153835
62. Placidi L, Cusumano D, Lenkowicz J, et al. On dose cube pixel spacing pre-processing for features extraction stability in dosiomic studies. *Phys Med.* 2021;(90):108–114. doi: 10.1016/j.ejmp.2021.09.010

ОБ АВТОРАХ

*** Нуднов Николай Васильевич**, д-р мед. наук, профессор;
адрес: Россия, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 86;
ORCID: 0000-0001-5994-0468;
eLibrary SPIN: 3018-2527;
e-mail: nudnov@rncrr.ru

Солодкий Владимир Алексеевич, д-р мед. наук, профессор,
академик РАН;
ORCID: 0000-0002-1641-6452;
eLibrary SPIN: 9556-6556;
e-mail: direktor@rncrr.ru

Иванников Михаил Евгеньевич;
ORCID: 0009-0007-0407-0953;
e-mail: ivannikovmichail@gmail.com

Шахвалиева Элина Саид-Аминовна;
ORCID: 0009-0000-7535-8523 ;
e-mail: shelina9558@gmail.com

Сотников Владимир Михайлович, д-р мед. наук, профессор;
ORCID: 0000-0003-0498-314X;
eLibrary SPIN: 3845-0154;
e-mail: vmsotnikov@mail.ru

Смыслов Алексей Юрьевич, канд. тех. наук;
ORCID: 0000-0002-6409-6756;
eLibrary SPIN: 9341-0037;
e-mail: smyslov.ay@gmail.com

AUTHORS' INFO

*** Nikolay V. Nudnov**, MD, Dr. Sci. (Med.), Professor;
address: 86 Profsoyuznaya street, 117997 Moscow, Russia;
ORCID: 0000-0001-5994-0468;
eLibrary SPIN: 3018-2527;
e-mail: nudnov@rncrr.ru

Vladimir A. Solodkiy, MD, Dr. Sci. (Med.), Professor, Academician
of the Russian Academy of Sciences;
ORCID: 0000-0002-1641-6452;
eLibrary SPIN: 9556-6556;
e-mail: direktor@rncrr.ru

Mikhail E. Ivannikov;
ORCID: 0009-0007-0407-0953;
e-mail: ivannikovmichail@gmail.com

Elina S-A. Shakhvalieva;
ORCID: 0009-0000-7535-8523;
e-mail: shelina9558@gmail.com

Vladimir M. Sotnikov, MD, Dr. Sci. (Med.), Professor;
ORCID: 0000-0003-0498-314X;
eLibrary SPIN: 3845-0154;
e-mail: vmsotnikov@mail.ru

Aleksei Yu. Smyslov, Cand. Sci. (Engin.);
ORCID: 0000-0002-6409-6756;
eLibrary SPIN: 9341-0037;
e-mail: smyslov.ay@gmail.com

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD430292>

Основы стандартной визуализации периферической нервной системы: МР-нейрография

С.Н. Морозова, В.В. Синькова, Д.А. Гришина, Т.А. Тумилович, А.О. Четкин,
М.В. Кротенкова, Н.А. Супонева

Научный центр неврологии, Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Периферические нейропатии относятся к одним из наиболее часто встречающихся неврологических расстройств. Несмотря на наличие хорошо зарекомендовавших себя и дополняющих друг друга методов инструментальной диагностики, таких как электронейромиография и ультразвуковое исследование, диагностика и дифференциальная диагностика поражения периферических нервов различного генеза, особенно их проксимальных отделов, может быть затруднена. Магнитно-резонансная томография периферических нервов в настоящее время активно внедряется в клиническую практику в качестве ценного дополнительного диагностического инструмента.

Акцент в представленной работе делается на основных преимуществах и ограничениях упомянутых методов исследования, истории использования магнитно-резонансной томографии для визуализации структур периферической нервной системы, основных требованиях к протоколу магнитно-резонансной томографии периферических нервов различной локализации с учётом современных технических возможностей, в том числе подробно рассматриваются используемые для стандартного исследования последовательности магнитно-резонансной томографии и их диагностическое значение, рекомендации по использованию контрастирования, преимущества и недостатки различных механизмов жироводавления.

В настоящее время практически отсутствуют стандартизированные описания периферических нервов в норме и при различных патологиях, что снижает диагностическую ценность метода. Перспектива повышения его информативности и расширения использования связана, в том числе, с проведением исследований на больших группах здоровых испытуемых и пациентов с различными патологиями периферической нервной системы.

Ключевые слова: магнитно-резонансная томография; периферические нейропатии; МРТ-протокол; жироводавление; трёхмерная визуализация.

Как цитировать:

Морозова С.Н., Синькова В.В., Гришина Д.А., Тумилович Т.А., Четкин А.О., Кротенкова М.В., Супонева Н.А. Основы стандартной визуализации периферической нервной системы: МР-нейрография // *Digital Diagnostics*. 2023. Т. 4, № 3. С. 356–368. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD430292>

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD430292>

Conventional magnetic resonance imaging of peripheral nerves: MR-neurography

Sofya N. Morozova, Viktoriya V. Sinkova, Darya A. Grishina, Taisiya A. Tumilovich, Andrey O. Chechetkin, Marina V. Krotenkova, Natalya A. Suponeva

Research Center of Neurology, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Peripheral neuropathy is known to be one of the most common neurological disorders. Despite the great diagnostic value of electroneuromyography and ultrasound, addressing the diagnostics and differential diagnostics of peripheral nerve diseases of different origin could be challenging. In recent years, magnetic resonance tomography has been increasingly used for evaluating cases of suspected or established peripheral neuropathy with excellent results.

This manuscript mainly deals with the advantages and limitations of the aforementioned diagnostic instruments, technical considerations according to different anatomy of peripheral nerves, along with state-of-the-art technical decisions, frequently used magnetic resonance imaging sequences and their diagnostic value based on own observation, and recommendations for contrast enhancement use and different methods of fat suppression.

Currently, there is practically no standardized description of normal magnetic resonance imaging features of peripheral nerves, as well as their changes in different diseases. The evaluation of images is mainly based on the radiologist experience, which obviously decreases method's diagnostic value. Studies of large numbers involving healthy volunteers and patients with peripheral neuropathies of different origin are required to address this issue.

Keywords: magnetic resonance imaging; peripheral nervous system diseases; MRI scans; fat suppression; imaging; three-dimensional.

To cite this article:

Morozova SN, Sinkova VV, Grishina DA, Tumilovich TA, Chechetkin AO, Krotenkova MV, Suponeva NA. Conventional magnetic resonance imaging of peripheral nerves: MR-neurography. *Digital Diagnostics*. 2023;4(3):356–368. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD430292>

Received: 17.05.2023

Accepted: 04.07.2023

Published: 24.08.2023

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD430292>

外周神经系统标准成像基础：磁共振神经影像学

Sofya N. Morozova, Viktoriya V. Sinkova, Darya A. Grishina, Taisiya A. Tumilovich, Andrey O. Chechetkin, Marina V. Krotenkova, Natalya A. Suponeva

Research Center of Neurology, Moscow, Russian Federation

简评

周围神经病是最常见的神经系统疾病之一。虽然已经有了完善的辅助仪器诊断方法，如神经肌电描记术和超声检查，但对各种原因引起的周围神经损坏，尤其是其近端损坏的诊断和鉴别诊断仍很困难。目前，外周神经的磁共振成像已被积极引入临床实践，成为一种宝贵的辅助诊断工具。

本文重点介绍上述检查方法的主要优点和局限性、使用磁共振成像来显示出周围神经系统结构的历史、考虑到现代技术能力的不同定位周围神经磁共振成像协议书的主要要求，包括对标准检查中使用的磁共振成像序列及其诊断价值、使用造影剂的建议以及各种脂肪抑制机制的优缺点的详细讨论。

目前，对正常和各种病变下的周围神经几乎没有标准化的描述，这降低该方法的诊断价值。为了提高该方法的信息量并扩大其应用范围，还需要对大量健康受试者和患有各种外周神经系统疾病的患者进行研究。

关键词：磁共振成像；周围神经病；磁共振成像协议书；脂肪抑制；三维成像。

引用本文：

Morozova SN, Sinkova VV, Grishina DA, Tumilovich TA, Chechetkin AO, Krotenkova MV, Suponeva NA. 外周神经系统标准成像基础：磁共振神经影像学. *Digital Diagnostics*. 2023;4(3):356–368. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD430292>

收到：17.05.2023

接受：04.07.2023

发布日期：24.08.2023

ВВЕДЕНИЕ

Периферические нейропатии — группа заболеваний, при которых поражаются волокна периферических нервов, — относятся к числу наиболее распространённых неврологических расстройств [1] и классифицируются в зависимости от количества поражённых нервов как мононейропатии, множественные мононейропатии и полинейропатии. Причины развития периферических нейропатий разнообразны и включают наследственный и приобретённый генез (компрессионно-ишемический, посттравматический, инфекционный, неопластический, дисметаболический, дизиммунный, токсический, дефицитарный и др.) [2, 3].

При подозрении на периферическую нейропатию диагностика включает тщательный сбор жалоб и анамнеза, в том числе семейного, а также детальный неврологический осмотр [4]. Лабораторное обследование позволяет в большинстве случаев установить причину нейропатии. Среди вспомогательных инструментальных методов золотым стандартом в настоящее время является электронейромиография, оценивающая проводящую функцию двигательных и чувствительных нервов верхних и нижних конечностей, косвенно — их проксимальные отделы, а также состояние иннервируемых мышц (денервационную активность) [5]. Результаты этих исследований позволяют, как правило, определить локализацию, распространённость, уровень и тип поражения [6, 7].

Тем не менее электрофизиологическое исследование имеет ряд ограничений, к которым относится, например, затруднённая диагностика при локализации патологического процесса в плохо доступных для исследования нервной проводимости проксимальных отделах периферической нервной системы [8]. Кроме того, при острых и хронических периферических нейропатиях с более ранним поражением дистальных отделов они часто оказываются подвергнутыми выраженной дегенерации уже при первом визите пациента, что также осложняет диагностику (наблюдается так называемый floor effect — ограниченный предел значений данных, которые метод может достоверно указать) [3]. По той же причине может вызывать вопросы дифференциальная диагностика между полным повреждением поперечного сечения дистального отрезка нерва и более проксимально расположенным частичным повреждением пучков в составе периферического нерва [9]. Немаловажным ограничивающим фактором является также зависимость полученных результатов от опыта врача, проводящего электронейромиографическое исследование, так называемая оператор-зависимость метода.

Ультразвуковое исследование с высоким разрешением является вспомогательным высокоинформативным методом диагностики патологии периферических нервных структур с возможностью их оценки в реальном времени на большом протяжении, измерения площади

поперечного сечения нерва, определения интраневральных изменений и оценки околоневральных тканей [10, 11]. Ультразвуковое исследование периферических нервов в настоящее время активно применяется в диагностике посттравматических, компрессионных, дизиммунных и наследственных нейропатий, а также объёмных образований нервов [12]. Тем не менее результативность и воспроизводимость данного метода сильно зависят от опыта врача, выполняющего исследование [13], а также класса ультразвукового прибора и частоты используемого датчика. В отличие от электрофизиологических методов исследования, данная методика не позволяет определить тип поражения нервных волокон. Кроме того, глубоко расположенные периферические нервы, близко прилежащие к костным структурам и внутренним органам, могут быть плохо видны или вовсе недоступны для ультразвукового исследования [14].

Магнитно-резонансная томография (МРТ) недостаточно активно используется для диагностики заболеваний периферической нервной системы, что связано с несколькими основными моментами: во-первых, необходимостью получения трёхмерных (3D) изображений с очень высоким разрешением для визуализации морфологических изменений в структуре нерва, что увеличивает время исследования и подверженность получаемых изображений артефактам; во-вторых, с недостаточным описанием нормы при визуализации периферической нервной системы, что затрудняет интерпретацию полученных данных. Однако с учётом технических достижений последних десятилетий МРТ рассматривается как альтернативный метод диагностики патологии периферически нервов и может быть показана при подозрении на патологические изменения труднодоступной для традиционных методов локализации, планировании хирургического вмешательства, неоднозначности данных электронейромиографии и ультразвукового исследования, а также при травме, лучевой терапии и оперативном вмешательстве в анамнезе [15].

ИСТОРИЯ ПРИМЕНЕНИЯ МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНОЙ ТОМОГРАФИИ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПЕРИФЕРИЧЕСКОЙ НЕРВНОЙ СИСТЕМЫ

Несмотря на то, что даже сегодня МРТ назначается пациентам с подозрением на периферическую нейропатию чаще с целью исключения объёмного образования, внутри или непосредственно прилежащего к нерву [16], уже в начале 1990-х годов группой учёных во главе с A.G. Filler и F.A. Howe [17, 18] были разработаны первые МР-последовательности с более высоким пространственным разрешением и увеличенной контрастностью периферических нервов для их оптимальной визуализации, а также введён сам термин «магнитно-резонансная нейрография» (МР-нейрография).

В клинической практике МР-нейрография начала применяться для помощи в диагностике и планировании терапии при травматических повреждениях нервов и туннельных синдромах. В первом случае МР-нейрография позволяет отличить полный разрыв нерва с повреждением всех соединительнотканых поддерживающих структур (нейротмезис), требующий хирургического вмешательства, от аксонального повреждения без разрушения оболочек (аксонотмезис) или локальной демиелинизации в связи с компрессией или тракцией с сохранностью аксональных структур (нейропраксия), при которых существует возможность спонтанного восстановления [19]. МР-нейрография может быть использована и для мониторинга восстановления нерва в спорных случаях. Частое применение методики нашло в определении и локализации точного места повреждения при туннельных синдромах (компрессионных нейропатиях), показанием для МР-нейрографии может являться также неудовлетворительный результат хирургического лечения.

В настоящее время это направление активно развивается относительно других заболеваний периферической нервной системы [3]. Так, МРТ сплетений входит в поддерживающие критерии диагностики хронической воспалительной демиелинизирующей полинейропатии и мультифокальной моторной невропатии [20, 21]. Преимуществом методики являются неинвазивность, малая зависимость от оператора, проводящего исследование, возможность определения точной локализации патологических изменений и их чёткого соотношения с соседними анатомическими структурами, комплексная оценка всех анатомических структур в области исследования, возможность пересмотра изображений и исследования в динамике.

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПРОТОКОЛУ ИССЛЕДОВАНИЯ

МР-нейрография — методика для оптимизации визуализации периферических нервов с применением нерв-селективных (изображение нервных стволов на фоне подавления сигнала от окружающих их тканей и сосудов [22]) и нерв-неселективных последовательностей с высоким разрешением и контрастностью.

Исследование сопряжено с рядом трудностей. Прежде всего, в связи с тем, что поперечный размер нерва в норме оставляет всего несколько миллиметров, а толщина отдельных пучков — порядка 1 мм и менее, визуализация отдельных нервных стволов требует высокого разрешения изображений. Получение таких изображений связано с более длительным временем исследования и более низким соотношением сигнал-шум. Кроме того, наличие жировой ткани вокруг и внутри нервных структур затрудняет как качественную, так и количественную оценку структур периферической нервной

системы, поэтому для их визуализации используют различные механизмы жироподавления, которые сами по себе могут влиять на оценку изображений и снижать соотношение сигнал-шум. Сложный анатомический ход некоторых периферических нервов требует применения трёхмерных последовательностей, основным недостатком которых является наложение сигнала от сосудов, в связи с чем изображение может стать шумным и зернистым. Тем не менее в настоящее время методика МРТ-визуализации периферической нервной системы активно развивается [23, 24].

Получение достаточного пространственного разрешения для визуализации отдельных пучков нервных волокон внутри нерва возможно при проведении исследования на аппаратах с величиной индукции магнитного поля 3 Тл (Тесла) [3]. Они обеспечивают более высокое соотношение сигнал-шум, что позволяет получить большую контрастность, большее разрешение в плоскости сканирования и минимальную толщину среза. Минимальная толщина среза обеспечивает более высокое разрешение в сквозной плоскости для двухмерных последовательностей и более высокое изотропное разрешение для трёхмерных последовательностей [25]. Тем не менее использование 1,5-тесловых томографов также возможно, кроме того, они могут иметь преимущество при визуализации пациентов с металлическими имплантатами в поле сканирования [26].

Пространственное разрешение в оцениваемой плоскости для минимизации эффекта частичного объёма и визуализации отдельных структур нерва и расположенных между ними рыхлой соединительной и жировой тканей не должно быть ниже 0,1–0,4×0,1–0,4 мм, а толщина среза для двухмерных последовательностей — более 2–3,5 мм для сплетений и 4–5 мм для конечностей с минимальным или отсутствием межсрезового промежутка [3, 25]. Несмотря на то, что двухмерные последовательности остаются стандартом для первичной оценки, трёхмерные последовательности (с возможностью реконструкции изображений в разных плоскостях) являются необходимыми для визуализации и решения проблемы, когда анатомический ход нервов сложен и имеющиеся данные неоднозначны. Размечать срезы следует относительно длинных осей, т.е. параллельно или перпендикулярно конечности или ходу нерва, насколько это возможно [25].

Оптимальные результаты визуализации достигаются при использовании многоканальных катушек для конкретных частей тела, однако возможны и другие решения, основанные на замене недостающих катушек имеющимися при условии правильного расположения частей тела пациента. Специализированные многоканальные катушки с ускоряющими факторами могут быть дополнены мягкими поверхностными катушками для расширения поля обзора; комбинирование спинальной встроенной и мягкой поверхностной катушек рекомендуется для исследования на уровне туловища [27].

Перед планированием исследования следует учитывать максимально возможную площадь покрытия, а также то, что с увеличением количества срезов растёт и продолжительность исследования. Для получения более высокого пространственного разрешения поле обзора следует уменьшить, насколько это возможно, при этом пустое пространство вокруг исследуемой области должно составлять не более 20% её размеров для оптимальной оценки нервов малого диаметра [25].

Правильное и комфортное позиционирование пациента необходимо также для уменьшения двигательных артефактов [3]. Перед исследованием поясничных и крестцовых сплетений следует опустошить мочевой пузырь, чтобы избежать наложения сигнала от него на реконструкции в проекции максимальной интенсивности (maximum intensity projection, MIP).

СТАНДАРТНЫЕ МЕТОДИКИ МР-НЕЙРОГРАФИИ И ИХ КЛИНИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

В рутинной клинической практике чаще всего проводят качественную оценку T1- и T2-взвешенных изображений, а также изображений, взвешенных по протонной плотности, контрастность которых основана на процессах

T1- и T2-релаксации и плотности расположения протонов в тканях тела человека, с использованием последовательностей спинного или градиентного эха. Для уменьшения сигнала от жировой ткани с целью визуализации отёка и постконтрастной визуализации используют различные методики жироподавления, особенности которых будут подробнее рассматриваться ниже. Вне зависимости от области исследования рекомендуется сканирование минимум в двух плоскостях, желательно с получением хотя бы одной трёхмерной последовательности.

T1-взвешенные изображения

Данные изображения являются необходимыми при проведении нейрографии и могут быть получены с помощью последовательностей спинного эха или инверсия-восстановление с подавлением сигнала от свободной жидкости в аксиальной плоскости для нервов конечностей и в коронарной плоскости для сплетений. Длина эхо-комплекса варьирует от 3 до 8 при получении двухмерных изображений и от 33 до 68 при трёхмерной визуализации. Разрешение от 0,3 до 0,4 мм в плоскости сканирования позволяет идеально визуализировать интраневральный жир, утолщение эпинеурия, исчезновение периневрального жира из-за объёмного образования или фиброза (рис. 1) [28]. Кроме того, данные изображения незаменимы

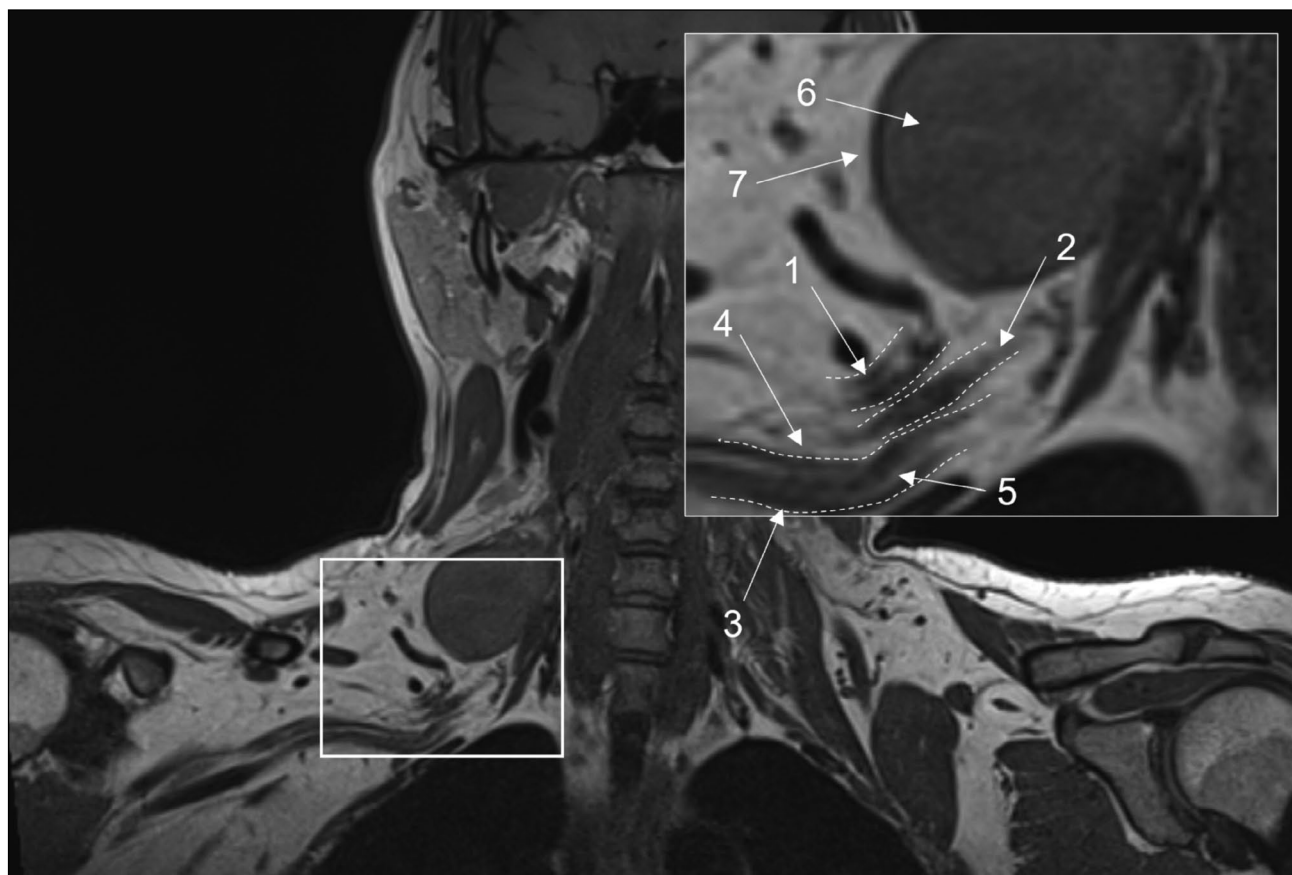


Рис. 1. Магнитно-резонансная томография плечевых сплетений в режиме 3D-T1, коронарная проекция: 1 — верхний ствол; 2 — средний ствол; 3 — нижний ствол; 4 — периневральная жировая клетчатка; 5 — эндоневральный жир; 6 — объёмное образование (шваннома); 7 — интактная жировая клетчатка вокруг образования.

для оценки степени жировой инфильтрации и атрофии мышц. Они также менее чувствительны к артефактам от движения и артефактам магнитной восприимчивости и, как правило, позволяют выявить отёк, прерывание хода или изменение конфигурации поперечного сечения нерва вследствие компрессии [3].

МР-нейрография с контрастированием

Для сканирования с целью пред- и постконтрастной визуализации рекомендуется использовать T1-взвешенные трёхмерные последовательности градиентного эха с подавлением сигнала от жировой ткани с возможной последующей субтракцией полученных изображений; в остальных случаях их использование для трёхмерной визуализации ограничено в связи с более сильной подверженностью артефактам и более низкой контрастностью.

Благодаря наличию гематоневрального барьера сигнал от неповреждённых нервов не изменяется после внутривенного введения контрастного вещества [24]. В случае травматических изменений или туннельных синдромов контрастирование не имеет большого диагностического значения, так как обычно данные состояния исследуются на МРТ в подостром периоде. При данных патологиях возможно контрастирование лишь денервированных мышц, которые, однако, хорошо визуализируются на изображениях с жироподавлением, чувствительных к сигналу от жидкости [25]. При наследственных и демиелинизирующих полинейропатиях контрастирование коррелирует с изменением сигнала от нервов и также не имеет большого смысла.

В других случаях, таких как подозрение на невральное или периневральное объёмное образование, лимфому, периневральные инфекционные воспалительные процессы и иные патологии, сопровождающиеся нарушением гематоневрального барьера, может быть рекомендовано исследование с контрастным веществом [29]. Помимо перечисленных патологий, исследование с контрастированием может быть использовано также после декомпрессивной хирургии при сохранении клинической симптоматики с целью исключения гиперпродукции фиброзной ткани [30].

В настоящее время разрабатываются нерв-специфичные контрастные средства, например с селективным накоплением в областях демиелинизации, которое постепенно уменьшается по мере регенерации волокна, однако методики пока не получили одобрения для клинического использования [24].

T2-взвешенные изображения

Ранние наблюдения показали, что T2-изображения являются наиболее важными для диагностики повреждений периферических нервов [31]. Последовательности без жироподавления, как правило, двухмерные, обеспечивают хорошую визуализацию эпинеурия (рис. 2). Подавление сигнала от жировой ткани позволяет дифференцировать сравнительно высокий сигнал от нерва и окружающую жировую ткань. Для T2-взвешенных изображений без жироподавления рекомендуемое время эха — более 90 мсек (миллисекунд), в идеале — 100–105 мсек, для последовательностей с подавлением сигнала от жировой ткани оно может быть уменьшено до 60–80 мсек. Последние, которые также называют изображениями, чувствительными к жидкости, обеспечивают идеальную визуализацию нерва (рис. 3) с повышением сигнала в области патологических изменений [32]. В основу методик жироподавления легли разница частоты прецессии воды и жира, а также большее время T2-релаксации и меньшее время T1-релаксации жировой ткани по сравнению с мышечной тканью или нервными волокнами [2].

Необходимого уменьшения сигнала от жировой ткани можно добиться с помощью частотно-селективного жироподавления (FatSat — fat saturation) в T2-взвешенных последовательностях спинного эха с присущими им высокой контрастностью, практически отсутствием артефактов от пульсации и менее выраженными артефактами магнитной восприимчивости [33]. Однако следует избегать этого метода при наличии в поле обзора металлоконструкций. Самым же большим недостатком является плохое жироподавление вдали от центра поля обзора или негетогенное жироподавление вдоль изгибов тела [25].

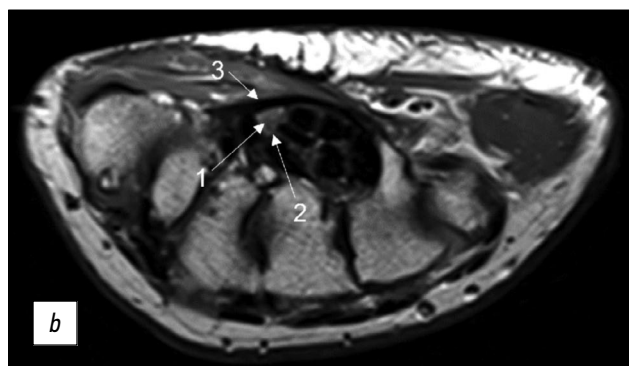
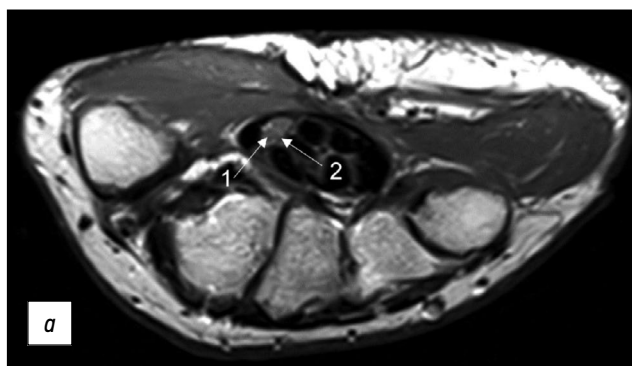


Рис. 2. Магнитно-резонансная томография кисти в режиме T2 у пациентки с синдромом карпального канала, аксиальная проекция: *a* — на уровне проксимальных эпифизов пястных костей; *b* — на уровне дистальных отделов головчатой кости (1 — отдельные пучки в составе срединного нерва, 2 — эпинеурий, 3 — утолщённый до 1,29 мм удерживатель сгибателей).

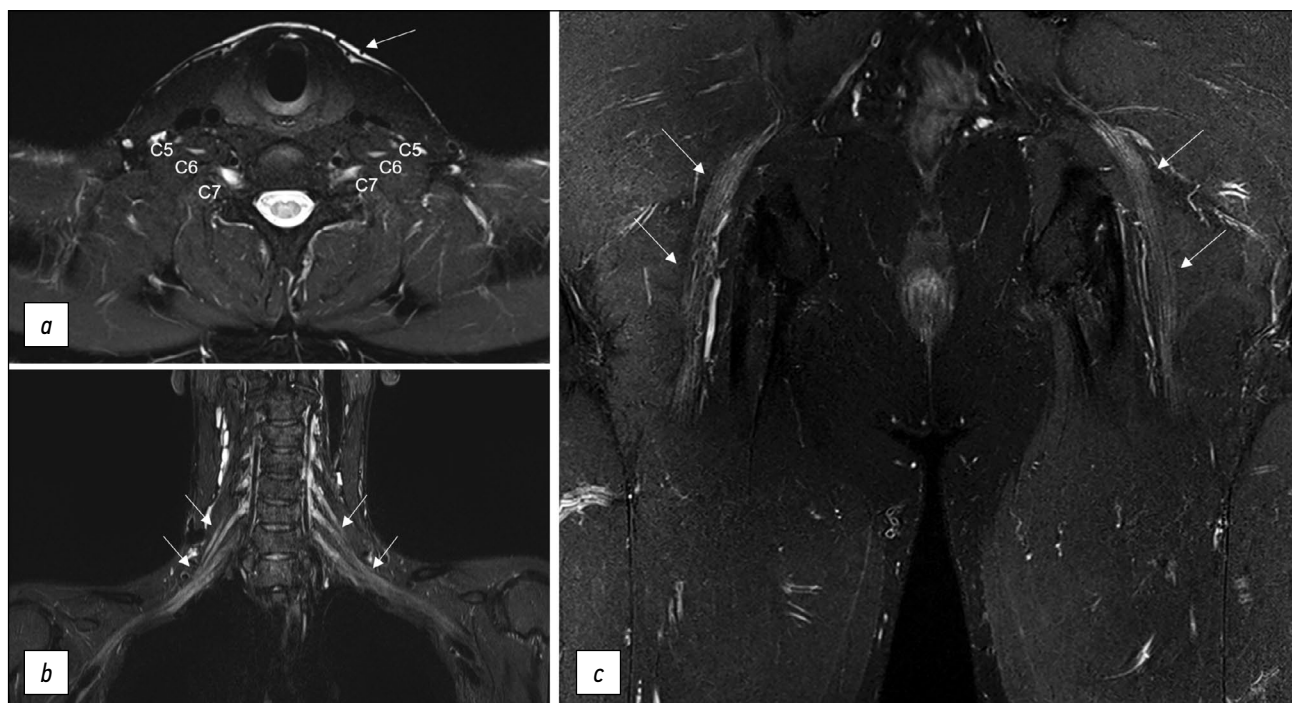


Рис. 3. Различные методики жироподавления на магнитно-резонансных томограммах: *a* — плечевых сплетений в режиме T2-FatSat, аксиальная проекция: отмечены передние ветви спинномозговых нервов C5, C6, C7, без патологии, имеют слабо повышенный сигнал, обращает на себя внимание неоднородное жироподавление с неудовлетворительным сигналом по периферии зоны интереса (стрелка); *b* — печевых сплетений в режиме STIR, коронарная проекция: однородное жироподавление на протяжении всего обширного поля обзора, нормальные элементы плечевых сплетений имеют слабоповышенный сигнал (стрелки); *c* — седалищных нервов в режиме T2-Dixon, коронарная проекция: методика обеспечивает однородное жироподавление, нормальные седалищные нервы имеют слабоповышенный MP-сигнал (стрелки).

Последовательность инверсия–восстановление с коротким временем инверсии (STIR: short-TI inversion recovery, где TI — время инверсии в миллисекундах) позволяет добиться отличного однородного жироподавления при разных величинах магнитной индукции и степенях гомогенности поля, однако обеспечивает лишь неселективное жироподавление (наряду с жиром подавляет сигнал от всех тканей с коротким T1); не может использоваться после внутривенного контрастирования (так как в данной последовательности суммируется T2- и T1-контрастность, обеспечивая получение только подобных T2-взвешенным изображениям); часто подвержена артефактам от пульсации, ложному повышению сигнала от нерва в связи усилением сигнала от внутриневральной жидкости, а также сопровождается низким соотношением сигнал–шум. В связи с этим данная последовательность чаще используется для визуализации сплетений, в случаях, если частотно-селективное жироподавление не сработало по каким-либо причинам или вследствие наличия металла в поле обзора, с применением различных модификаций: например, более низким временем эха (30–40 мсек), большим количеством времён эха и более широкой частотой пропускания (400–500 Hz/Px).

Наиболее оптимальной последовательностью для МР-нейрографии конечностей является комбинация техник FatSat и STIR — T2-взвешенная последовательность

инверсия–восстановление со спектральным адиабатным инвертирующим импульсом, настроенным на частоту прецессии жира (T2 SPAIR — SPectral Attenuated Inversion Recovery), так как она обеспечивает сравнимое с последовательностью STIR гомогенное, однако превышающее его по селективности жироподавление в центре и на периферии поля обзора с более высоким SNR и минимальными артефактами от пульсации. Как правило, сигнал от нормального нерва на T2-SPAIR-изображениях изоинтенсивен сигналу от скелетных мышц. В зависимости от предпочтений пользователя возможно использование слабого и сильного типа контрастности, при этом слабый обеспечивает большую гомогенность сигнала, а сильный — большую изоинтенсивность сигнала от нерва. Основным недостатком данной последовательности является возможность плохого жироподавления на нескольких краевых срезах, особенно на границе области сканирования, а также невозможность её использования на низкопольных аппаратах и при выраженной негомогенности магнитного поля. Кроме того, хотя T2-SPAIR менее чувствительна к артефактам от металла по сравнению с последовательностями с частотно-селективным жироподавлением, в случае наличия металла в области сканирования рекомендуется всё же использовать последовательность STIR.

Оптимальное жироподавление достигается с помощью методики Dixon, хотя изображение также может

страдать вдали от центральной зоны сканирования [25]. Данная методика была предложена Томасом Диксоном в 1984 году [34], в её основе лежит разница в резонансной частоте протонов жира и воды (эффект химического сдвига). Для получения изображений используется последовательность с двумя временами эха: при первом сигналы от воды и жира находятся в фазе, при втором — в противофазе. Диксон показал, что из этих изображений путём математических вычислений могут быть сгенерированы дополнительные с сигналом только от воды (dixonW) и только от жира (dixonF). На изображениях с сигналом только от воды (dixonW) сигнал от жира подавлен. Данные изображения нашли широкое применение в клинической практике, так как обеспечивают однородное жироподавление, а единственным значимым артефактом является локальная смена сигнала от воды и жира (fat-water swap), связанная с неомогенностью магнитного поля, часто на границе зоны покрытия катушки [35]. Однако в связи с длительным временем сканирования использование этого метода для нейрографии ограничено двумерной визуализацией.

В целом, патологически изменённый периферический нерв будет иметь больший диаметр и большую интенсивность сигнала на T2-взвешенных изображениях, более очевидную при применении различных методик жироподавления. Структура и размеры нерва могут быть оценены относительно соседних нервов и сосудистого пучка, который может служить внутренним референсом [36]. Так, например, в случае седалищного нерва увеличение отношения его диаметра к диаметру сосуда более 0,89 может считаться патологическим [37]. Помимо сигнала от самого нерва, следует обращать внимание на сигнал от прилежащих к нему мышц: увеличение интенсивности сигнала от них является визуализационным коррелятом денервационных изменений, которые могут появиться уже на 5-й день после повреждения нерва [38].

Следует отметить, что для достоверной интерпретации данных МР-нейрографии необходимо знать о возможных подводных камнях. Прежде всего, локальное повышение интенсивности сигнала в местах физиологической констрикции на изображениях, чувствительных к сигналу от жидкости, наблюдается у большого числа (около 60%) здоровых добровольцев, поэтому помимо самого факта изменения сигнала необходимо оценивать его распространённость, а также сопутствующие отёк и утолщение нерва. Другим важным фактором, о котором следует помнить, является так называемый эффект магического угла, который заключается в повышении интенсивности МР-сигнала от структур, расположенных под углом 55 градусов относительно направления магнитного поля В0 в последовательностях с коротким ТЕ (менее 32 мс) [3].

Повышение сигнала на T2-взвешенных изображениях является чувствительным, однако неспецифичным маркером повреждения периферических нервов, который не может быть посчитан и требует тщательной

интерпретации с учётом различных паттернов поражений, включающих его распространённость, а также изменение калибра нервов различных видов.

ШКАЛА NS-RADS

В настоящее время вышло руководство по применению шкалы NS-RADS (Neuropathy Score Reporting and Data System, основанная на данных MPT) [39], которая, по мнению авторов, может быть использована для более стандартизированного отражения типа и степени тяжести периферической нейропатии в свете анамнеза и данных обследования. В спектр патологий, которые охватывает шкала, входят травматические повреждения (NS-RADS I1-5), компрессионные синдромы (NS-RADS E1-3), новообразования (NS-RADS N1-4), диффузные нейропатии (NS-RADS D1-2) и послеоперационные состояния (NS-RADS P11-3) различной степени тяжести, а также денервационные изменения региональных мышц (NS-RADS M0-3), недостаточное количество данных для оценки изменений (NS-RADS 0) и отсутствие или незначительные изменения, не имеющие клинического значения (NS-RADS U). Кроме того, отдельно выделяют категорию NS-RADS NOS (not otherwise specified), к которой предлагают отнести случаи с неоднозначными данными анамнеза или результатами обследований при клиническом подозрении на нейропатию. Предполагается, что использование данной классификации позволит проводить стандартизированную оценку МРТ-изменений периферических нервов, повысит единообразие заключений экспертов и улучшит междисциплинарное взаимодействие для оптимизации клинической и научной работы. Подробнее с классификацией можно ознакомиться в первоисточнике, однако авторы полагают, что с более активным её внедрением в работу возможно появление новых категорий и разделов для оптимизации использования в клинической практике [40].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Следует отметить, что томографы с величиной магнитной индукции 3 Т, несмотря на вероятно большую выраженность артефактов от металлоконструкций, тем не менее предпочтительны для использования при визуализации периферических нервов в связи с присущим им более высоким соотношением сигнал-шум. Целесообразно также выделить минимальные требования к протоколу исследования: для визуализации сплетений рекомендуется использование трёхмерных последовательностей, тогда как для исследования нервов конечностей допустимо получение двумерных изображений, однако с небольшой толщиной среза (2,5–3,5 мм); важным условием является высокое разрешение оцениваемых данных (0,2–0,8 мм в плоскости сканирования); необходимо включать в протокол последовательности для получения изображений с жироподавлением, чувствительных к сигналу

от жидкости (STIR, T2SPAIR, T2FatSat, T2Dixon), T1- и T2-взвешенных изображений, при этом хотя бы один режим со срезами, расположенными перпендикулярно длинной оси нервов.

Необходимо подчеркнуть, что МРТ, несмотря на все сложности и ограничения, является высокоинформативным методом исследования периферической нервной системы и всё больше внедряется в клиническую практику, так как позволяет диагностировать патологические изменения периферических нервов с одновременной комплексной оценкой окружающих их структур, а также проводить дифференциальную диагностику определённых нозологий. Перспектива повышения информативности и расширения внедрения МРТ-исследований с использованием стандартных методик МР-нейрографии связана, прежде всего, с формированием популяционной возрастной нормативной базы с описанием размеров и особенностей сигнала от нервов. Актуальным является также вопрос подробной характеристики паттернов поражения нервов при различных патологиях.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Вклад авторов. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение поисково-аналитической работы и подготовку статьи, прочли

и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распределён следующим образом: С.Н. Морозова — обзор публикаций по теме статьи, написание текста рукописи, подготовка иллюстраций, В.В. Синькова — обзор публикаций по теме статьи, подготовка иллюстраций, Д.А. Гришина — обзор публикаций по теме статьи, научная консультация, редактирование текста рукописи, Т.А. Тумилович — обзор публикаций по теме статьи, подготовка иллюстраций, А.О. Чечеткин — научная консультация, редактирование текста рукописи, утверждение окончательного варианта статьи, М.В. Кротенкова, Н.А. Супонева — научная консультация, концептуализация обзора, утверждение окончательного варианта статьи.

ADDITIONAL INFORMATION

Funding source. This article was not supported by any external sources of funding.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work. S.N. Morozova — search for publications on the topic, manuscript text writing, figures preparation, V.V. Sinkova — search for publications on the topic, figures preparation, D.A. Grishina — scientific consult, manuscript text editing, T.A. Tumilovich — search for publications on the topic, figures preparation, A.O. Chechetkin — scientific consult, manuscript text editing, approval of the final version, M.V. Krotchenkova, N.A. Suponeva — the concept of the study, scientific consult, approval of the final version.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hammi C., Yeung B. Neuropathy. [Updated 2022 Oct 15]. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2023. Режим доступа: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK542220/>. Дата обращения: 15.08.2023.
2. Chen Y., Haacke E.M., Li J. Peripheral nerve magnetic resonance imaging // *F1000Research*. 2019. Vol. 8. P. 1803. doi: 10.12688/f1000research.19695.1
3. Kollmer J., Bendszus M. Magnetic resonance neurography: Improved diagnosis of peripheral neuropathies // *Neurotherapeutics*. 2021. Vol. 18. P. 2368–2383. doi: 10.1007/s13311-021-01166-8
4. Thompson P.D., Thomas P.K. Clinical patterns of peripheral neuropathy // P.J. Dyck, P.K. Thomas, editors. *Peripheral neuropathy*, 4th ed. Philadelphia: Elsevier Saunders, 2005. P. 1137–1161.
5. Пирадов М.А., Супонева Н.А., Гришина Д.А., Павлов Э.В. Электронейромиография: алгоритмы и рекомендации при полинейропатиях. Москва: Горячая линия-Телеком, 2021. 198 с.
6. Li J. Molecular regulators of nerve conduction: Lessons from inherited neuropathies and rodent genetic models // *Exp Neurol*. 2015. Vol. 267. P. 209–218. doi: 10.1016/j.expneurol.2015.03.009
7. Chung T., Prasad K., Lloyd T.E. Peripheral neuropathy: Clinical and electrophysiological considerations // *Neuroimaging Clin N Am*. 2014. Vol. 24, N 1. P. 49–65. doi: 10.1016/j.nic.2013.03.023
8. Dyck P.J., Oviatt K.F., Lambert E.H. Intensive evaluation of referred unclassified neuropathies yields improved diagnosis // *Ann Neurol*. 1981. Vol. 10, N 3. P. 222–226. doi: 10.1002/ana.410100304
9. Stewart J.D. Peripheral nerve fascicles: Anatomy and clinical relevance // *Muscle Nerve*. 2003. Vol. 28, N 5. P. 525–541. doi: 10.1002/mus.10454
10. Мансурова А.В., Чечёткин А.О., Супонева Н.А., и др. Возможности ультразвукового исследования в диагностике и дифференциальной диагностике бокового амиотрофического склероза: обзор литературы // *Нервно-мышечные болезни*. 2022. Т. 12, № 1. С. 21–28. doi: 10.17650/2222872120221212128
11. Gasparotti R., Padua L., Briani C., Lauria G. New technologies for the assessment of neuropathies // *Nat Rev Neurol*. 2017. Vol. 13. P. 203–216. doi: 10.1038/nrneurol.2017.31
12. Deshmukh S., Sun K., Komaraju A., et al. Peripheral nerve imaging: Magnetic resonance and ultrasound correlation // *Magn*

- Reson Imaging Clin N Am. 2023. Vol. 31, N 2. P. 181–191. doi: 10.1016/j.mric.2023.01.003
- 13.** Ohana M., Moser T., Moussaoui A., et al. Current and future imaging of the peripheral nervous system // *Diagn Interv Imaging*. 2014. Vol. 95. P. 17–26. doi: 10.1016/j.diii.2013.05.008
- 14.** Muller I., Miguel M., Bong D.A., et al. The peripheral nerves: Update on ultrasound and magnetic resonance imaging // *Clin Exp Rheumatol*. 2018. Vol. 36, Suppl. 114. P. 145–158.
- 15.** Aggarwal A., Chhabra A. Magnetic resonance neurography: Is it so complicated that it needs a touch of genius? // *Eur Radiol*. 2022. Vol. 32, N 6. P. 3912–3914. doi: 10.1007/s00330-021-08525-1
- 16.** Singh T., Kliot M. Imaging of peripheral nerve tumors // *Neurosurg Focus*. 2007. Vol. 22, N 6. P. E6. doi: 10.3171/foc.2007.22.6.7
- 17.** Filler A.G., Howe F.A., Hayes C.E., et al. Magnetic resonance neurography // *Lancet*. 1993. Vol. 341, N 8846. P. 659–661. doi: 10.1016/0140-6736(93)90422-d
- 18.** Howe F.A., Filler A.G., Bell B.A., Griffiths J.R. Magnetic resonance neurography // *Magn Reson Med*. 1992. Vol. 28, N 2. P. 328–338. doi: 10.1002/mrm.1910280215
- 19.** Mazal A.T., Faramarzian A., Jonathan D.S., et al. MR neurography of the brachial plexus in adult and pediatric age groups: Evolution, recent advances, and future directions // *Expert Review of Medical Devices*. 2020. doi: 10.1080/17434440.2020.1719830
- 20.** Joint Task Force of the EFNS and the PNS. European Federation of Neurological Societies/Peripheral Nerve Society guideline on management of multifocal motor neuropathy. Report of a joint task force of the European Federation of Neurological Societies and the Peripheral Nerve Society—first revision // *J Peripher Nerv Syst*. 2010. Vol. 15, N 4. P. 295–301. doi: 10.1111/j.1529-8027.2010.00290.x
- 21.** Van den Bergh P.Y., van Doorn P.A., Hadden R.D., et al. European Academy of Neurology/Peripheral Nerve Society guideline on diagnosis and treatment of chronic inflammatory demyelinating polyradiculoneuropathy: Report of a joint Task Force—Second revision // *J Peripher Nerv Syst*. 2021. Vol. 26, N 3. P. 242–268. doi: 10.1111/jns.12455
- 22.** Chhabra A., Madhuranthakam A.J., Andreisek G. Magnetic resonance neurography: Current perspectives and literature review // *Eur Radiol*. 2018. Vol. 28, N 2. P. 698–707. doi: 10.1007/s00330-017-4976-8
- 23.** Szaro P., McGrath A., Cizek B., Geijer M. Magnetic resonance imaging of the brachial plexus. Part 1: Anatomical considerations, magnetic resonance techniques, and non-traumatic lesions // *Eur J Radiol*. 2022. Vol. 20, N 9. P. 100392. doi: 10.1016/j.ejro.2021.100392
- 24.** Holzgrefe R.E., Wagner E.R., Singer A.D., Daly Ch.A. Imaging of the peripheral nerve: Concepts and future direction of magnetic resonance neurography and ultrasound // *Current Concepts*. 2019. Vol. 44, N 12. P. 1066–1079. doi: 10.1016/j.jhsa.2019.06.021
- 25.** Chhabra A., Flammang A., Padua A. Jr., et al. Magnetic resonance neurography: Technical considerations // *Neuroimaging Clin N Am*. 2014. Vol. 24, N 1. P. 67–78. doi: 10.1016/j.nic.2013.03.032
- 26.** Chalian M., Chhabra A. Top-10 tips for getting started with magnetic resonance neurography // *Semin Musculoskelet Radiol*. 2019. Vol. 23, N 4. P. 347–360. doi: 10.1055/s-0039-1677727
- 27.** Sneag D.B., Queler S. Technological advancements in magnetic resonance neurography // *Curr Neurol Neurosci Rep*. 2019. Vol. 19, N 10. P. 75. doi: 10.1007/s11910-019-0996-x
- 28.** Thakkar R.S., Del Grande F., Thawait G.K., et al. Spectrum of high-resolution MRI findings in diabetic neuropathy // *AJR Am J Roentgenol*. 2012. Vol. 199, N 2. P. 407–412. doi: 10.2214/AJR.11.7893
- 29.** Thawait S.K., Chaudhry V., Thawait G.K., et al. High-resolution MR neurography of diffuse peripheral nerve lesions // *AJNR Am J Neuroradiol*. 2011. Vol. 32, N 8. P. 1365–1372. doi: 10.3174/ajnr.A2257
- 30.** McDonald C.M., Carter G.T., Fritz R.C., et al. Magnetic resonance imaging of denervated muscle: Comparison to electromyography // *Muscle Nerve*. 2000. Vol. 23, N 9. P. 1431–1434. doi: 10.1002/1097-4598(200009)23:9<1431::aid-mus16>3.0.co;2-p
- 31.** Stoll G., Bendszus M., Perez J., Pham M. Magnetic resonance imaging of the peripheral nervous system // *J Neurol*. 2009. Vol. 256, N 7. P. 1043–1051. doi: 10.1007/s00415-009-5064-z
- 32.** Chhabra A., Thawait G.K., Soldatos T., et al. High-resolution 3T MR neurography of the brachial plexus and its branches, with emphasis on 3D imaging // *AJNR Am J Neuroradiol*. 2013. Vol. 34, N 3. P. 486–497. doi: 10.3174/ajnr.A3287
- 33.** Bischoff C., Kollmer J., Schulte-Mattler W. State-of-the-art diagnosis of peripheral nerve trauma: Clinical examination, electrodiagnostic, and imaging // K.A. Haaster-Talini, G. Antoniadis, editors. *Modern concepts of peripheral nerve repair*. 1st ed. Springer International Publishing, 2017. doi: 10.1007/978-3-319-52319-4_2
- 34.** Dixon W.T. Simple proton spectroscopic imaging // *Radiology*. 1984. Vol. 153. P. 189–194. doi: 10.1148/radiology.153.1.6089263
- 35.** Grimm A., Meyer H., Nickel M.D., et al. Evaluation of 2-point, 3-point, and 6-point Dixon magnetic resonance imaging with flexible echo timing for muscle fat quantification // *Eur J Radiol*. 2018. Vol. 103. P. 57–64. doi: 10.1016/j.ejrad.2018.04.011
- 36.** Subhawong T.K., Wang K.C., Thawait S.K., et al. High-resolution imaging of tunnels by magnetic resonance neurography // *Skeletal Radiol*. 2012. Vol. 41. P. 15–31. doi: 10.1007/s00256-011-1143-1
- 37.** Chhabra A., Chalian M., Soldatos T., et al. 3-T high-resolution MR neurography of sciatic neuropathy // *Am J Roentgenol*. 2012. Vol. 198. P. 357–364. doi: 10.2214/AJR.11.6981
- 38.** Kollmer J., Bendszus M., Pham M. MR neurography: Diagnostic imaging in the PNS // *Clin Neuroradiol*. 2015. Vol. 25, Suppl. 2. P. 283–289. doi: 10.1007/s00062-015-0412-0
- 39.** Chhabra A., Deshmukh S.D., Lutz A.M., et al. Neuropathy score reporting and data system: A reporting guideline for MRI of peripheral neuropathy with a multicenter validation study // *AJR Am J Roentgenol*. 2022. Vol. 219, N 2. P. 279–291. doi: 10.2214/AJR.22.27422
- 40.** Chhabra A., Deshmukh S.D., Lutz A.M., et al. Neuropathy score reporting and data system (NS-RADS): MRI reporting guideline of peripheral neuropathy explained and reviewed // *Skeletal Radiol*. 2022. Vol. 51, N 10. P. 1909–1922. doi: 10.1007/s00256-022-04061-1

REFERENCES

1. Hammi C, Yeung B. Neuropathy. [Updated 2022 Oct 15]. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2023. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK542220/>.
2. Chen Y, Haacke EM, Li J. Peripheral nerve magnetic resonance imaging. *F1000Research*. 2019;(8):1803. doi: 10.12688/f1000research.19695.1
3. Kollmer J, Bendszus M. Magnetic resonance neurography: Improved diagnosis of peripheral neuropathies. *Neurotherapeutics*. 2021;18(4):2368–2383. doi: 10.1007/s13311-021-01166-8
4. Thompson PD, Thomas PK. Clinical patterns of peripheral neuropathy. In: Dyck PJ, Thomas PK, editors. *Peripheral neuropathy*. 4th ed. Elsevier Saunders, Philadelphia: 2005. P. 1137–1161.
5. Piradov MA, Suponeva NA, Grishina DA, Pavlov YeV. Electroneuromyography: Algorithms and recommendations in polyneuropathies. Moscow: Goryachaya liniya-Telecom; 2021. 198 p. (In Russ).
6. Li J. Molecular regulators of nerve conduction: Lessons from inherited neuropathies and rodent genetic models. *Exp Neurol*. 2015;(267):209–218. doi: 10.1016/j.expneurol.2015.03.009
7. Chung T, Prasad K, Lloyd TE. Peripheral neuropathy: Clinical and electrophysiological considerations. *Neuroimaging Clin N Am*. 2014;24(1):49–65. doi: 10.1016/j.nic.2013.03.023
8. Dyck PJ, Oviatt KF, Lambert EH. Intensive evaluation of referred unclassified neuropathies yields improved diagnosis. *Ann Neurol*. 1981;10(3):222–226. doi: 10.1002/ana.410100304
9. Stewart JD. Peripheral nerve fascicles: Anatomy and clinical relevance. *Muscle Nerve*. 2003;28(5):525–541. doi: 10.1002/mus.10454
10. Mansurova AV, Chechetkin AO, Suponeva NA, et al. Possibilities of ultrasound in the diagnosis and differential diagnosis of amyotrophic lateral sclerosis: A literature review. *Neuromuscular diseases*. 2022;12(1):21–28. (In Russ). doi: 10.17650/2222-8721-2022-12-1-21-28
11. Gasparotti R, Padua L, Briani C, Lauria G. New technologies for the assessment of neuropathies. *Nat Rev Neurol*. 2017;13(4):203–216. doi: 10.1038/nrneurol.2017.31
12. Deshmukh S, Sun K, Komaraju A, et al. Peripheral nerve imaging: Magnetic resonance and ultrasound correlation. *Magn Reson Imaging Clin N Am*. 2023;31(2):181–191. doi: 10.1016/j.mric.2023.01.003
13. Ohana M, Moser T, Moussaoui A, et al. Current and future imaging of the peripheral nervous system. *Diagn Interv Imaging*. 2014;95(1):17–26. doi: 10.1016/j.diii.2013.05.008
14. Muller I, Miguel M, Bong DA, et al. The peripheral nerves: Update on Ultrasound and magnetic resonance imaging. *Clin Exp Rheumatol*. 2018; 36(Suppl 114):145–58.
15. Aggarwal A, Chhabra A. Magnetic resonance neurography: Is it so complicated that it needs a touch of genius? *Eur Radiol*. 2022;32(6):3912–3914. doi: 10.1007/s00330-021-08525-1
16. Singh T, Kliot M. Imaging of peripheral nerve tumors. *Neurosurg Focus*. 2007;22(6):E6. doi: 10.3171/foc.2007.22.6.7
17. Filler AG, Howe FA, Hayes CE, et al. Magnetic resonance neurography. *Lancet*. 1993;341(8846):659–661. doi: 10.1016/0140-6736(93)90422-d
18. Howe FA, Filler AG, Bell BA, Griffiths JR. Magnetic resonance neurography. *Magn Reson Med*. 1992;28(2):328–338. doi: 10.1002/mrm.1910280215
19. Mazal AT, Faramarzalani A, Samet JD, et al. MR neurography of the brachial plexus in adult and pediatric age groups: Evolution, recent advances, and future directions. *Exp Rev Med Devices*. 2020;17(2):111–122. doi: 10.1080/17434440.2020.1719830
20. Joint Task Force of the EFNS and the PNS. European Federation of Neurological Societies/Peripheral Nerve Society guideline on management of multifocal motor neuropathy. Report of a joint task force of the European Federation of Neurological Societies and the Peripheral Nerve Society—first revision. *J Peripher Nerv Syst*. 2010;15(4):295–301. doi: 10.1111/j.1529-8027.2010.00290.x
21. Van den Bergh PY, van Doorn PA, Hadden RD, et al. European Academy of Neurology/Peripheral Nerve Society guideline on diagnosis and treatment of chronic inflammatory demyelinating polyradiculoneuropathy: Report of a joint Task Force—Second revision. *J Peripher Nerv Syst*. 2021;26(3):242–268. doi: 10.1111/jns.12455
22. Chhabra A, Madhuranthakam AJ, Andreisek G. Magnetic resonance neurography: Current perspectives and literature review. *Eur Radiol*. 2018;28(2):698–707. doi: 10.1007/s00330-017-4976-8
23. Szaro P, McGrath A, Cizek B, Geijer M. Magnetic resonance imaging of the brachial plexus. Part 1: Anatomical considerations, magnetic resonance techniques, and non-traumatic lesions. *Eur J Radiol*. 2022;20(9):100392. doi: 10.1016/j.ejro.2021.100392
24. Holzgrefe RE, Wagner ER, Singer AD, Daly ChA. Imaging of the peripheral nerve: Concepts and future direction of magnetic resonance neurography and ultrasound. *Curr Concepts*. 2019;44(12):1066–1079. doi: 10.1016/j.jhsa.2019.06.021
25. Chhabra A, Flammang A, Padua A, et al. Magnetic resonance neurography: Technical considerations. *Neuroimaging Clin N Am*. 2014;24(1):67–78. doi: 10.1016/j.nic.2013.03.032
26. Chalian M, Chhabra A. Top-10 tips for getting started with magnetic resonance neurography. *Semin Musculoskelet Radiol*. 2019;23(4):347–360. doi: 10.1055/s-0039-1677727
27. Sneag DB, Queler S. Technological advancements in magnetic resonance neurography. *Curr Neurol Neurosci Rep*. 2019;19(10):75. doi: 10.1007/s11910-019-0996-x
28. Thakkar RS, Del Grande F, Thawait GK, et al. Spectrum of high-resolution MRI findings in diabetic neuropathy. *AJR Am J Roentgenol*. 2012;199(2):407–412. doi: 10.2214/AJR.11.7893
29. Thawait SK, Chaudhry V, Thawait GK, et al. High-resolution MR neurography of diffuse peripheral nerve lesions. *AJNR Am J Neuroradiol*. 2011;32(8):1365–1372. doi: 10.3174/ajnr.A2257
30. McDonald CM, Carter GT, Fritz RC, et al. Magnetic resonance imaging of denervated muscle: Comparison to electromyography. *Muscle Nerve*. 2000;23(9):1431–1434. doi: 10.1002/1097-4598(200009)23:9<1431::aid-mus16>3.0.co;2-p
31. Stoll G, Bendszus M, Perez J, Pham M. Magnetic resonance imaging of the peripheral nervous system. *J Neurol*. 2009;256(7):1043–1051. doi: 10.1007/s00415-009-5064-z
32. Chhabra A, Thawait GK, Soldatos T, et al. High-resolution 3T MR neurography of the brachial plexus and its branches, with emphasis on 3D imaging. *AJNR Am J Neuroradiol*. 2013;34(3):486–497. doi: 10.3174/ajnr.A3287
33. Bischoff C, Kollmer J, Schulte-Mattler W. State-of-the-art diagnosis of peripheral nerve trauma: Clinical examination, electrodiagnostic, and imaging. In: Haaster-Talini KA, Antoniadis G, editors. *Modern concepts of peripheral nerve repair*. 1st ed. Springer International Publishing; 2017. doi: 10.1007/978-3-319-52319-4_2

34. Dixon WT. Simple proton spectroscopic imaging. *Radiology*. 1984;153(1):189–194. doi: 10.1148/radiology.153.1.6089263
35. Grimm A, Meyer H, Nickel MD, et al. Evaluation of 2-point, 3-point, and 6-point Dixon magnetic resonance imaging with flexible echo timing for muscle fat quantification. *Eur J Radiol*. 2018;(103):57–64. doi: 10.1016/j.ejrad.2018.04.011
36. Subhawong TK, Wang KC, Thawait SK, et al. High-resolution imaging of tunnels by magnetic resonance neurography. *Skeletal Radiol*. 2012;41(1):15–31. doi: 10.1007/s00256-011-1143-1
37. Chhabra A, Chalian M, Soldatos T, et al. 3-T high-resolution MR neurography of sciatic neuropathy. *Am J Roentgenol*. 2012;198(4):357–364. doi: 10.2214/AJR.11.6981
38. Kollmer J, Bendszus M, Pham M. MR neurography: Diagnostic imaging in the PNS. *Clin Neuroradiol*. 2015;25(Suppl 2):283–289. doi: 10.1007/s00062-015-0412-0
39. Chhabra A, Deshmukh SD, Lutz AM, et al. Neuropathy score reporting and data system: A reporting guideline for MRI of peripheral neuropathy with a multicenter validation study. *AJR Am J Roentgenol*. 2022;219(2):279–291. doi: 10.2214/AJR.22.27422
40. Chhabra A, Deshmukh SD, Lutz AM, et al. Neuropathy score reporting and data system (NS-RADS): MRI reporting guideline of peripheral neuropathy explained and reviewed. *Skeletal Radiol*. 2022;51(10):1909–1922. doi: 10.1007/s00256-022-04061-1

ОБ АВТОРАХ

*** Морозова Софья Николаевна**, канд. мед. наук;
адрес: Россия, 125637, Москва, Волоколамское шоссе, д. 80;
ORCID: 0000-0002-9093-344X;
eLibrary SPIN: 2434-7827;
e-mail: morozova@neurology.ru

Синькова Виктория Викторовна;
ORCID: 0000-0003-2285-2725;
e-mail: 000564321@mail.ru

Гришина Дарья Александровна, канд. мед. наук;
ORCID: 0000-0002-7924-3405;
eLibrary SPIN: 6577-1799;
e-mail: dgrishina82@gmail.com

Тумилович Таисия Александровна;
ORCID: 0000-0002-9538-9690;
eLibrary SPIN: 2264-9457;
e-mail: tumilovich.taisiya@bk.ru

Чечеткин Андрей Олегович, д-р мед. наук;
ORCID: 0000-0002-8726-8928;
eLibrary SPIN: 9394-6995;
e-mail: andreychechetkin@gmail.com

Кротенкова Марина Викторовна, д-р мед. наук;
ORCID: 0000-0003-3820-4554;
eLibrary SPIN: 9663-8828;
e-mail: krotenkova_mrt@mail.ru

Супонева Наталья Александровна, д-р мед. наук,
профессор, чл.-корр. РАН;
ORCID: 0000-0003-3956-6362;
eLibrary SPIN: 3223-6006;
e-mail: nasu2709@mail.ru

AUTHORS' INFO

*** Sofya N. Morozova**, MD, Cand. Sci. (Med.);
address: 80 Volokolamskoe shosse, 125637 Moscow, Russia;
ORCID: 0000-0002-9093-344X;
eLibrary SPIN: 2434-7827;
e-mail: morozova@neurology.ru

Viktoriya V. Sinkova;
ORCID: 0000-0003-2285-2725;
e-mail: 000564321@mail.ru

Darya A. Grishina, MD, Cand. Sci. (Med.);
ORCID: 0000-0002-7924-3405;
eLibrary SPIN: 6577-1799;
e-mail: dgrishina82@gmail.com

Taisiya A. Tumilovich;
ORCID: 0000-0002-9538-9690;
eLibrary SPIN: 2264-9457;
e-mail: tumilovich.taisiya@bk.ru

Andrey O. Chechetkin, MD, Dr. Sci. (Med.);
ORCID: 0000-0002-8726-8928;
eLibrary SPIN: 9394-6995;
e-mail: andreychechetkin@gmail.com

Marina V. Krotenkova, MD, Dr. Sci. (Med.);
ORCID: 0000-0003-3820-4554;
eLibrary SPIN: 9663-8828;
e-mail: krotenkova_mrt@mail.ru

Natalya A. Suponeva, MD, Dr. Sci. (Med.), Professor,
Corresponding member of the Russian Academy of Sciences;
ORCID: 0000-0003-3956-6362;
eLibrary SPIN: 3223-6006;
e-mail: nasu2709@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD375328>

Посмертные лучевые исследования в мировом и отечественном здравоохранении: анализ литературы и мнений российских специалистов

А.И. Щеголев, У.Н. Туманова

Национальный медицинский исследовательский центр акушерства, гинекологии и перинатологии имени академика В.И. Кулакова,
Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Несмотря на особую значимость вскрытий тел умерших больных с целью определения причины смерти и эффективности проведённого лечения, во всех странах отмечается прогрессирующее снижение их количества. Одновременно с этим наблюдается активное внедрение посмертных лучевых исследований для анализа тел умерших и погибших пациентов.

Представлен анализ данных литературы, обобщающих результаты анкетирования иностранных специалистов, а также мнений российских специалистов о возможностях и особенностях проведения посмертных лучевых исследований главным образом новорождённых и младенцев. Отмечено, что посмертные лучевые исследования проводятся как в рамках патологоанатомического вскрытия, так и судебно-медицинской экспертизы. В случаях насильственной смерти чаще проводили посмертную компьютерную томографию, при смерти от болезней — посмертную магнитно-резонансную томографию. Более часто использовалось общеклиническое оборудование, находящееся в клинических отделениях лучевой диагностики, чем оборудование, расположенное в морге, патологоанатомическом отделении или судебно-медицинском учреждении. Анализ результатов посмертных лучевых исследований в большинстве наблюдений проводили врачи-рентгенологи, намного реже имел место совместный анализ рентгенолога и патологоанатома. Подчёркивается, что в Российской Федерации посмертные лучевые исследования носят в основном единичный характер. В то же время, по мнению российских исследователей, в настоящее время — время развития персонализированной медицины, лучевых методик и информационных технологий — назрела необходимость использования посмертных лучевых исследований для объективизации и повышения точности традиционных аутопсий. При этом посмертные лучевые исследования, представляющие собой объективные оператор-независимые методы исследования тел погибших, следует рассматривать как высокоэффективный этап патологоанатомического и тем более судебно-медицинского вскрытия.

Ключевые слова: аутопсия; виртопсия; посмертная магнитно-резонансная томография; посмертная компьютерная томография; КТ; танаторadiология; обзор.

Как цитировать:

Щеголев А.И., Туманова У.Н. Посмертные лучевые исследования в мировом и отечественном здравоохранении: анализ литературы и мнений российских специалистов // *Digital Diagnostics*. 2023. Т. 4, № 3. С. 369–383. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD375328>

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD375328>

Postmortem radiology studies in global and national healthcare: literature analysis and perspectives of Russian specialists

Aleksandr I. Shchegolev, Ulyana N. Tumanova

Research Center for Obstetrics, Gynecology and Perinatology, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Despite the significant importance of autopsies for determining the cause of death and the evaluating the effectiveness of treatments, there is a progressive decrease in their number across all countries. At the same time, there is an active introduction of postmortem radiological studies to analyze the bodies of deceased patients.

The article presents literature analysis summarizing the results of surveys from foreign specialists, as well as the opinions of Russian specialists, regarding the possibilities and features of postmortem radiological studies, mainly focusing on deceased newborns and infants. It is noted that postmortem radiological studies are carried out as part of both pathoanatomical autopsy and forensic medical examination. Postmortem computed tomography in cases of violent death and postmortem magnetic resonance imaging in cases of death from diseases were performed more often. General clinical equipment located in clinical radiology departments was more frequently used than those located in the mortuary, pathology department, or forensic facility. The analysis of the results of postmortem radiological examinations was predominantly carried out by radiologists, with a joint analysis involving a radiologist and a pathologist being less common. It is emphasized that in the Russian Federation, postmortem radiological studies are mostly of a single nature. According to Russian researchers, in the current era of advancing personalized medicine, radiation techniques, and information technologies, there arises a need to use postmortem radiological studies to objectify and improve the accuracy of traditional autopsies. Postmortem radiological studies, which are objective operator-independent methods of examining the bodies of dead people, should be considered as a highly effective stage of pathology and, especially, forensic autopsy.

Keywords: autopsy; virtopsy; postmortem computed tomography; postmortem magnetic resonance imaging; thanatoradiology; review.

To cite this article:

Schegolev AI, Tumanova UN. Postmortem radiology studies in global and national healthcare: literature analysis and perspectives of Russian specialists. *Digital Diagnostics*. 2023;4(3):369–383. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD375328>

Received: 03.05.2023

Accepted: 27.05.2023

Published: 22.08.2023

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD375328>

全球和国内医疗保健中的放射尸检：文献分析和俄罗斯专家的观点

Aleksandr I. Shchegolev, Ulyana N. Tumanova

Research Center for Obstetrics, Gynecology and Perinatology, Moscow, Russian Federation

简评

虽然尸检对确定死因和治疗效果非常重要，但各国的尸检数量都在逐步减少。与此同时，医生正在积极引入放射尸检，以分析死亡病人的尸体。

本文介绍对文献数据的分析，这些数据总结外国专家的问卷调查结果，以及俄罗斯专家对放射尸检（主要是新生儿和婴儿）的可能性和特殊性的看法。据指出，放射尸检是在病理解剖和法医学鉴定的框架内进行的。在暴力致死的病例中，更常进行死后计算机断层扫描；在疾病致死的病例中，则进行死后磁共振成像。与停尸房、病理解剖科或法医学机构里的设备相比，临床放射诊断科的普通临床设备使用频率更高。大多数放射尸检都是由放射科医生进行分析的，而由放射科医生和病理学家共同进行分析的情况要少得多。需要强调的是，在俄罗斯联邦，放射尸检大多是零星的。同时，据俄罗斯研究人员称，在当前个性化医学、放射技术和信息技术发展的时代，有必要利用放射尸检来客观化和提高传统尸检的准确度。同时，放射尸检是独立于操作人员的客观尸体检查方法，应被视为病理解剖的高效阶段，更是法医学尸检的高效阶段。

关键词：尸检；虚拟尸检；死后磁共振成像；死后计算机断层扫描；CT；死后放射学；综述。

引用本文：

Schegolev AI, Tumanova UN. 全球和国内医疗保健中的放射尸检：文献分析和俄罗斯专家的观点. *Digital Diagnostics*. 2023;4(3):369–383. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD375328>

收到: 03.05.2023

接受: 27.05.2023

发布日期: 22.08.2023

ВВЕДЕНИЕ

Окончательное заключение о причине смерти больного пациента возложено на патологоанатомическую службу, когда в результате вскрытия тела умершего больного подтверждается правильность клинического диагноза или выявляется диагностическая ошибка, устанавливаются особенности течения заболевания и звенья танатогенеза, определяется эффективность применения диагностических и лечебных мероприятий, формируется статистика смертности [1]. Особую значимость патологоанатомические вскрытия имеют в области перинатальных исследований, позволяющих выявить наследственные и врождённые заболевания, а также определить риск их развития при последующих беременностях [2]. Однако, начиная с 50-х годов прошлого столетия, во всех зарубежных странах, где для проведения вскрытия требуется согласие родственников, отмечается прогрессирующее снижение их количества, обусловленное в основном религиозными мотивами, длительным периодом задержки захоронения, а также нежеланием лечащих врачей в получении информации, которая может поставить под сомнение тактику проведённого лечения [3, 4].

Наряду с этим развитие медицинского оборудования и диагностических методик сопровождалось внедрением посмертных лучевых исследований для анализа тел умерших и погибших пациентов. Такие посмертные лучевые исследования в основном были связаны с судебно-медицинской практикой. Так, в 90-х годах прошлого столетия в Институте судебной медицины Бернского университета (Швейцария) началось активное использование методов 3D-оптического сканирования поверхности тела пострадавшего для более лучшего документирования имеющихся внешних повреждений и сравнения последних с предполагаемым орудием их нанесения. Затем там стали выполняться посмертная компьютерная (КТ) и магнитно-резонансная (МРТ) томографии с последующей оценкой их возможностей по сравнению с традиционным вскрытием [5]. В США под эгидой Управления военной судебно-медицинской службы (Office of the Armed Forces Medical Examiner, OAFME) всем погибшим военнослужащим перед вскрытием проводилась посмертная мультиспиральная КТ, что в сочетании с результатами аутопсии позволяло лучше оценить характер боевых ранений [6, 7]. Проведение посмертной мультиспиральной КТ погибшим в результате землетрясения на Гаити в январе 2020 года позволило рационально сортировать тела погибших для эффективного проведения последующей аутопсии [8].

В настоящее время посмертные лучевые исследования выполняются уже во многих странах как в рамках судебно-медицинской экспертизы, так и патологоанатомического вскрытия, что находит отражение в прогрессирующем увеличении количества публикаций [9, 10]. Однако до сих пор отсутствуют единые мнения в отношении

объектов (возрастная группа пациентов, характер патологии и др.), вида аппарата и места его расположения, а также специальности и квалификации сотрудников, проводящих и анализирующих результаты посмертных лучевых исследований.

Данные сведения, несомненно, являются актуальными в первую очередь для тех, кто непосредственно планирует внедрить и выполнять подобные исследования в своём учреждении, городе, регионе. Особую актуальность посмертные лучевые исследования имеют для Российской Федерации в силу многонационального населения и различного вероисповедания на её территориях. Наряду с достаточно высокой оснащённостью лучевым оборудованием медицинских организаций посмертные лучевые исследования проводятся в основном лишь эпизодически в единичных учреждениях.

Цель работы — анализ опыта, рекомендаций и предложений иностранных и российских специалистов, связанных с посмертными лучевыми исследованиями с учётом возможностей и особенностей их проведения.

ПОСМЕРТНЫЕ ЛУЧЕВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В МИРОВОМ И ОТЕЧЕСТВЕННОМ ЗДРАВООХРАНЕНИИ

Условия и этапы проведения анкетирования

В основу работы положен анализ результатов 4 анкетирования членов Европейского общества детской радиологии (European Society of Paediatric Radiology, ESPR) и Международного общества судебной радиологии и визуализации (International Society for Forensic Radiology and Imaging, ISFRI) в 2013–2021 годах; сведений из литературных источников, представленных в базах данных eLibrary и National Center for Biotechnology Information (PubMed и PubMed Central) и посвящённых особенностям проведения посмертных лучевых исследований, а также мнений российских участников круглого стола «Танато-радиология: реальные возможности организации и практического использования в системе здравоохранения», прошедшего 08 октября 2022 года в Москве в рамках II Научно-практической конференции Межрегионального танаториологического общества «Лучевая диагностика для патологической анатомии и судебной медицины: от прижизненной к посмертной».

В связи с отсутствием единых общепринятых международных положений об организации и выполнении посмертных лучевых исследований нами был проведён анализ данных литературы о результатах опросов зарубежных специалистов, проводящих такие исследования [11–14]. Однако необходимо отметить, что в данных анкетированиях участвовали медицинские учреждения исключительно перинатального и детского профиля.

В рамках первого опроса (2013 год) анкеты были разосланы 244 членам ESPR [11]. В анализ было

включено 66 анкет из 66 учреждений, при этом посмертные лучевые исследования проводились в 47 (71%) учреждениях 17 стран: Австралии, Австрии, Бразилии, Великобритании, Венгрии, Германии, Израиля, Ирландии, Канады, Нидерландов, Новой Зеландии, Норвегии, США, Финляндии, Франции, Швейцарии и Швеции. Наибольшее количество ответов и, соответственно, учреждений было из Великобритании (11), США (9) и Нидерландов (5).

В трёх последующих исследованиях к тестированию были приглашены члены ESPR и ISFRI. Так, во втором анкетировании (2016–2017 годы) опросники были направлены членам вышеуказанных обществ из 25 учреждений [12]. Анализу были подвергнуты ответы, полученные из 20 учреждений 11 стран: Великобритании, Австралии, США и Польши (по 3 учреждения), Нидерландов (2), Дании, Италии, Швейцарии, Новой Зеландии, Канады и Японии (по 1).

В третьем анкетировании (2018–2019 годы) опросники были разосланы всем 14 членам рабочей группы по посмертной визуализации ESPR и 17 членам рабочей группы ISFRI, представляющих 25 различных учреждений [13]. В обработку были включены ответы из 11 учреждений, где проводились посмертные лучевые исследования в перинатальном и детском периодах, представляющих 7 стран: Австралию (3 учреждения), Великобританию (2), Нидерланды (2), Бельгию (1), Швейцарию (1), Новую Зеландию (1) и Канаду (1).

В 2021 году прошло четвёртое анкетирование, при котором электронные письма также были отправлены 22 членам рабочей группы по посмертной визуализации ESPR из 26 учреждений. Анализу были подвергнуты 18 ответов из 18 учреждений 9 стран: Великобритании (6 учреждений), Австралии (3), Германии и Нидерландов (по 2), Австрии, Бельгии, Венгрии, Новой Зеландии и Канады (по 1), которые были опубликованы G. Chambers с соавт. [14].

Необходимо отметить, что в вышеперечисленных четырёх исследованиях (анкетированиях) часть вопросов дублировалась, другая часть — отличалась. Начальная часть вопросов касалась выяснения объектов посмертных лучевых исследований.

Анализ результатов анкетирования

Согласно полученным ответам первого анкетирования [11], в 32% (15 из 47) учреждений исследовались все мертворождённые, в 26% (12/47) и 17% (8/47) — все умершие новорождённые и младенцы соответственно. В большинстве же учреждений проводились исследования лишь отдельных тел мертворождённых (в 45%), умерших новорождённых (в 49%) и младенцев (в 49%).

По данным второго анкетирования [12] только в 1/3 (35%) учреждений посмертные лучевые исследования проводились во всех случаях гибели плодов и детей. В третьем исследовании [13] вообще отсутствовали

учреждения, где проводились тотальные посмертные лучевые исследования всех умерших. По данным же четвёртого анкетирования [14] во всех учреждениях проводились выборочные исследования, при этом в рамках судебно-медицинской экспертизы чаще всего (в 92,9%) проводились исследования тел погибших новорождённых (возраст 0–28 дней), младенцев (1–12 месяцев) и детей (1–12 лет), реже (85,7%) — подростков (возраст 13–18 лет), ещё реже (42,9%) — плодов. При ненасильственной смерти частота посмертных лучевых исследований тел умерших новорождённых и младенцев, детей, а также подростков была ниже: 82,4; 58,5 и 52,9% соответственно. Частота же исследования погибших плодов, наоборот, была выше (76,5%) [14].

В качестве дополнения можно привести опыт Королевского лазарета Лестера (Robert Kilpatrick Clinical Sciences Building Leicester Royal Infirmary в г. Лестер, Великобритания), где ещё в 2004 году в лучевом отделении начали проводить регулярные (24 часа в сутки 7 дней в неделю) посмертные лучевые исследования тел умерших новорождённых и детей [15].

При анализе места расположения аппаратов для посмертных лучевых исследований в двух первых анкетированиях было отмечено более частое использование общеклинического оборудования по сравнению с оборудованием, расположенным в морге, патологоанатомическом отделении или судебно-медицинском учреждении (55% против 45%) [12]. По данным третьего опроса [13], все исследователи проводили посмертную МРТ на аппаратах, расположенных в клинических отделениях лучевой диагностики, при этом ни в одном из анализируемых центров не было специального МР-томографа исключительно для посмертной визуализации и ни одного, расположенного в морге или патологоанатомическом отделении.

Разноречивые сведения были установлены в отношении того, какие используются методы (и, соответственно, оборудование) посмертного лучевого исследования. При первом [11] и четвёртом [14] анкетировании в ответах чаще всего фигурировало рентгенографическое исследование (в 81 и 100% случаев соответственно), на втором месте по частоте использования стояла КТ (в 51 и 88,9% соответственно), затем МРТ (в 38 и 61,1%) и реже всего ультразвуковое исследование (в 8,5 и 27,8%). Примечательно, что в большинстве летальных случаев использовалось два или более различных аппаратов (методов) лучевых исследований трупа, при этом ультразвуковое исследование всегда сопровождалось лучевым исследованием. Однако при третьем анкетировании все участники указали на проведение только посмертной МРТ [13].

Дискутабельным моментом всегда был и остаётся вопрос, кто должен проводить посмертные лучевые исследования, и ещё более важным — кто будет оценивать их результаты. По данным второго анкетирования, наиболее часто (в 65% случаев) лучевые исследования

выполнял врач-рентгенолог или рентгенолаборант отделения лучевой диагностики, гораздо реже (в 15%) — персонал морга или врач-патологоанатом и лишь в одном учреждении — врач судебно-медицинский эксперт [12]. При третьем анкетировании в 90,9% учреждений исследования проводил врач-рентгенолог или рентгенолаборант и в 9,1% — врач-специалист по МРТ [13].

В отношении специалистов, проводящих анализы результатов посмертных лучевых исследований, при первом анкетировании чаще назывались врач-рентгенолог (89% случаев), в том числе детский рентгенолог (64%), намного реже (17%) проводился совместный анализ рентгенолога и патологоанатома [11]. При втором анкетировании в 45% наблюдений фигурировал врач-рентгенолог, в 40% — совместный анализ рентгенолога и патологоанатома [12].

Анализируя данные мировой литературы, необходимо отметить публикацию S.C. Shelmerdine с соавт. [12], существенной особенностью которой явилось представление согласованного протокола посмертного КТ-исследования. Важной задачей исследования G. Chambers с соавт. [14] явился анализ финансирования и оплаты проводимых посмертных лучевых исследований. Данные разделы, несомненно, очень важны и в этой связи должны являться предметом отдельных публикаций, учитывающих особенности систем финансирования здравоохранения в различных странах. Тем не менее следует отметить, что основным препятствием для широкого и повсеместного проведения посмертных лучевых исследований, по мнению большинства исследователей, участвовавших в четвёртом анкетировании [14], является отсутствие специального, по возможности централизованного на национальном уровне источника финансирования. Так, в 2004 году Министерство здравоохранения Великобритании инициировало проведение посмертных лучевых исследований тел, главным образом погибших плодов и новорождённых, а также взрослых, в том числе для решения вопроса о возможной замене вскрытия лучевыми исследованиями [16]. В Нидерландах, где решение о проведении вскрытия принимается родителями, с 2010 года во всех случаях смерти детей предлагается посмертное КТ-исследование [17].

В нашей стране посмертные лучевые исследования носят в основном единичный характер [18–20]. Хотя собственные исследования, посвящённые изучению и внедрению танаторадиологических (КТ и МРТ) исследований в патологоанатомическую практику тел мертворождённых и умерших новорождённых, начали проводиться в ФГБУ «НМИЦ акушерства, гинекологии и перинатологии имени академика В.И. Кулакова» Минздрава России с 2011 года

[21, 22]. С 2018 года в Московской области в отдельных случаях судебно-медицинской экспертизы тел погибших проводили посмертную КТ [23, 24].

II НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ МЕЖРЕГИОНАЛЬНОГО ТАНАТОРАДИОЛОГИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА «ЛУЧЕВАЯ ДИАГНОСТИКА ДЛЯ ПАТОЛОГИЧЕСКОЙ АНАТОМИИ И СУДЕБНОЙ МЕДИЦИНЫ: ОТ ПРИЖИЗНЕННОЙ К ПОСМЕРТНОЙ»: КЛЮЧЕВЫЕ МОМЕНТЫ ЗАСЕДАНИЯ КРУГЛОГО СТОЛА

Возможности организации и практического использования танаторадиологии

Учитывая актуальность внедрения посмертных лучевых исследований в Российской Федерации, в октябре 2022 года в рамках II Научно-практической конференции Межрегионального танаторадиологического общества «Лучевая диагностика для патологической анатомии и судебной медицины: от прижизненной к посмертной» состоялся круглый стол на тему «Танаторадиология: реальные возможности организации и практического использования в системе здравоохранения» [25], модератором которого выступил Ю.А. Васильев, директор ГБУЗ «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий» Департамента здравоохранения города Москвы, главный внештатный специалист по лучевой и инструментальной диагностике Департамента здравоохранения Москвы.

Все участники круглого стола отметили, что в Российской Федерации в соответствии с Федеральным законом от 21 ноября 2011 года № 323-ФЗ¹ (статья 67) все умершие направляются на патологоанатомическое вскрытие, в том числе в обязательном порядке, несмотря на имеющееся заявление об его отказе, тела мертворождённых, детей, умерших в возрасте до двадцати восьми дней жизни включительно. При наличии или подозрении на насильственную смерть обязательно проводят судебно-медицинское вскрытие. Соответственно, цель патологоанатомического вскрытия (статья 67, п. 1) — получение данных о причине смерти человека и диагнозе заболевания, а судебно-медицинской экспертизы (статья 62, п. 1) — установление обстоятельств, подлежащих доказыванию по конкретному делу.

Согласно ныне действующему приказу Министерства здравоохранения и социального развития Российской

¹ Федеральный закон от 21.11.2011 № 323-ФЗ «Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации». Режим доступа: <https://base.garant.ru/12191967/>.

Федерации от 12 мая 2010 года № 346н², вид, характер и объём предстоящей экспертизы определяет руководитель судебно-экспертного учреждения. Он также определяет исполнителя (исполнителей) для производства экспертизы и привлечённых сотрудников экспертных, научных, образовательных и других учреждений. Примечательно, что эксперт должен использовать медицинские технологии, разрешённые к применению на территории Российской Федерации, в первую очередь технологии и методики, не связанные с видоизменением, разрушением или уничтожением объектов исследования. Более того, в п. 47.8 данного документа указано, что при наружном исследовании трупа для уточнения характера и особенностей повреждений или болезненных изменений костей скелета вначале (при наличии технической возможности) производят их рентгенографию. Другими словами, посмертная рентгенография даже рекомендована при проведении судебно-медицинского исследования, однако, в соответствии с вышеуказанным приказом, только для костей. При этом в стандарт оснащения государственных судебно-медицинских учреждений, согласно приложению 2 к приказу № 364н, входят рентгеновский аппарат и цифровая мобильная рентгеновская система.

Выбор наиболее информативного метода посмертного исследования

Говоря о патологоанатомическом вскрытии, последнее, в соответствии с приказом Министерства здравоохранения Российской Федерации от 06 июня 2013 года № 354н³, проводится врачом-патологоанатомом, при этом неотъемлемой частью патологоанатомического вскрытия считаются гистологический, биохимический, микробиологический и другие необходимые методы исследований отдельных органов, тканей умершего или их частей. Для проведения указанных исследований биологический материал передаётся в соответствующее структурное подразделение медицинской организации. Одним из таких необходимых методов исследования может являться и лучевое исследование.

Примечательно, что о важности лучевого, в частности рентгенологического, исследования трупа ещё в 1969 году писал наш соотечественник патологоанатом И.И. Медведев в руководстве для прозекторов больниц «Основы патологоанатомической техники»: «рентгенологический метод весьма мало используется патологоанатомами, хотя он давно уже имеет все основания для широкого применения, <...> поэтому можно настоятельно рекомендовать устанавливать в прозектурах рентгеновские аппараты» [26]. Автор подчёркивает, что рентгенологическое

исследование позволяет обнаруживать тонкие изменения структуры костей, костные опухоли, остеохондропатии, участки обызвествления, инородные тела. Более того, по мнению И.И. Медведева, «применение рентгенологического метода в патологической анатомии может сыграть огромную роль в развитии и самой рентгенодиагностики» [26].

Важно, что врождённые аномалии костного скелета, являясь самостоятельным пороком или проявлением синдрома, могут включать в себя патологию лицевого черепа, позвоночника, верхних и нижних конечностей. В подобных случаях наиболее эффективным и объективным методом посмертной диагностики аномалий развития костей, особенно мелких и лицевого черепа, у мертворождённых и умерших новорождённых, превышающим возможности традиционного патологоанатомического вскрытия, в настоящее время однозначно является посмертная КТ [27, 28]. Соответственно, при обсуждении преимуществ различных методов лучевых исследований участники круглого стола, являющиеся судебно-медицинскими экспертами, в первую очередь называли КТ, позволяющую наиболее эффективно визуализировать повреждения и переломы костей, степень смещения отломков, ход раневого канала, кровоизлияния, инородные тела, включая пули [29, 30]. Важным достоинством КТ при судебно-медицинской экспертизе трупа является малое время исследования и, соответственно, высокая пропускная способность аппарата, что позволяет проводить исследования трупов в случаях массовой гибели людей (транспортные и природные катастрофы, боевые действия, террористические акты), а наличие передвижных КТ-модулей позволит выполнять исследования даже непосредственно на месте происшествия. Посмертная МРТ при судебно-медицинской экспертизе трупа имеет меньшую востребованность по сравнению с КТ, хотя характеризуется лучшей визуализацией мягких тканей и паренхиматозных органов.

По нашему мнению, в основе выбора метода исследования должна лежать целесообразность получения максимальной информации в каждом конкретном случае. Последнее подтверждается и данными литературы. Так, I.S. Roberts с соавт. [31] установлено, что КТ способствует более точному, по сравнению с МРТ, определению причины смерти взрослых пациентов. К преимуществам КТ авторы отнесли лучшую визуализацию кальцинатов венечных артерий, участков кровоизлияний и переломов. МРТ же была более чувствительна при остром инфаркте миокарда и патологии мягких тканей [31]. По данным C. Wijetunga с соавт. [32], комплексное посмертное КТ

² Приказ Министерства здравоохранения и социального развития РФ от 12.05.2010 № 346н «Об утверждении Порядка организации и производства судебно-медицинских экспертиз в государственных судебно-экспертных учреждениях Российской Федерации». Режим доступа: <https://base.garant.ru/12177987/#friends>.

³ Приказ Министерства здравоохранения РФ от 06.06.2013 № 354н «О порядке проведения патологоанатомических вскрытий». Режим доступа: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70443162/>.

и аутопсийное исследование выявили больше повреждений в случаях смерти от травм, чем каждый метод по отдельности, тогда как M. Proisy с соавт. [33] установили сильное соответствие между данными посмертной КТ и аутопсии, при этом существенные расхождения были отмечены только при патологии лёгких. T. Sieswerda-Noogendoorn с соавт. [34] показали сильную корреляцию между посмертной КТ и аутопсией в случаях насильственной смерти, отсутствие корреляции в случаях естественной смерти и совпадение КТ с аутопсией, когда причина смерти изначально не была установлена. По данным B.V. Krentz с соавт. [35], результаты аутопсии в целом превосходят возможности посмертной КТ в отношении выявления изменений мягких тканей и сосудов, в то время как КТ эффективней для визуализации повреждений скелета.

При сравнении возможностей посмертной КТ и МРТ O.J. Arthurs с соавт. [36] установили, что МРТ характеризуется более высокой диагностической точностью по сравнению с КТ при исследовании плодов с гестационным возрастом менее 24 недель и аналогичной — для плодов большего срока и новорождённых. В этой связи для визуализации тел погибших плодов и детей авторы рекомендуют использовать посмертную МРТ, поскольку она наиболее эффективна для определения патологии головного мозга, сердца и почек. Действительно, посмертная МРТ позволяет определить степень зрелости головного мозга, визуализировать врождённые аномалии его развития и патологические изменения [37, 38], оценить состояние ткани лёгких для определения живорождения и наличия врождённой пневмонии, а также степень гипоплазии лёгких как звена танато-генеза [39–41]; без вскрытия анатомических полостей и разрезов тканей определить выраженность анасарки и объём скоплений свободной жидкости в серозных полостях [42, 43]. В результате крупного проспективного исследования S. Thayyil с соавт. [44] сделали заключение, что точность посмертной МРТ соответствует результатам вскрытия тел погибших плодов, новорождённых и младенцев и уступает в наблюдениях смерти детей старше 1 года.

Можно резюмировать, что посмертная КТ наиболее информативна для визуализации:

- травматических, в первую очередь механических, повреждений и раневого канала, особенно в областях, технически сложных для традиционного вскрытия (кости и ткани лицевого скелета, основания черепа, дистальных отделов конечностей, позвоночника);
- кровоизлияний и скоплений жидкостей в органах, тканях и полостях тела;
- скоплений воздуха и газов в тканях, органах, в просвете сосудов и полостях тела;
- особенностей зубного ряда, в том числе для идентификации личности;

- инородных тел, включая медицинские зонды, катетеры.

Весьма эффективно посмертное КТ-исследование замёрзших, обгоревших, гнилостно изменённых, а также трупов в состоянии мумификации и сапонификации. Ограничениями же для проведения посмертной КТ считаются низкая эффективность нативного исследования для визуализации повреждений и заболеваний мягких тканей, паренхиматозных и полых органов, а также поражений спинного мозга. В этой связи для оценки состояния сосудов и полостей сердца, в том числе при их врождённых аномалиях и ранениях, следует проводить КТ с введением контрастных препаратов [45, 46].

В свою очередь, посмертная МРТ позволяет установить повреждения и заболевания мягких тканей и паренхиматозных органов, а также головного и спинного мозга, ушибов костей, кровоизлияний. По сравнению с КТ, посмертная МРТ более эффективна для исследования тел погибших плодов, мертворождённых и умерших новорождённых.

К ограничениям посмертной МРТ относят недостаточную визуализацию повреждений и заболеваний органов дыхательной системы у взрослых пациентов, полых органов и желудочно-кишечного тракта, а также трубчатых костей. Затрудняют анализ МР-томограмм наличие артефактов от имеющихся в теле металлических элементов.

К сожалению, как КТ, так и МРТ не позволяют провести микроскопическое, биохимическое, токсикологическое, микробиологическое, вирусологическое и генетическое исследование образцов тканей и органов, необходимых, в частности, для определения гистологического вида и характера опухоли, возбудителя инфекционного процесса, нарушенных путей метаболизма, отравляющего вещества. Для выполнения таких исследований рекомендуется проведение минимально инвазивного вскрытия, включающего в себя посмертное лучевое исследование и взятие при помощи биопсийной иглы образцов тканей и органов для последующих вышеперечисленных исследований [47, 48]. Примечательно, что подобный метод доказал свою эффективность не только для посмертной диагностики, но и защиты от инфицирования SARS-CoV-2 персонала прозектур при вскрытии тел больных, погибших от COVID-19 [49, 50]. Следует также отметить, что эффективность визуализации поражений органов и тканей зависит также от возраста, массы тела и состояния тканей [51].

На основании собственного опыта танаторадиологических исследований [52–54] считаем, что для полноценного анализа тел мертворождённых и умерших новорождённых следует проводить комплексное посмертное лучевое исследование, включающее КТ — для точной визуализации аномалий костной системы и скоплений газов, МРТ — для оценки тканей и внутренних органов, КТ с контрастным усилением сосудов — для определения состояния сосудов и сердца. Вместе с тем основными

факторами для выбора вида лучевого исследования в настоящее время является наличие аппарата и возможность проведения на нём подобного исследования.

Выбор учреждения для проведения посмертного исследования

Поскольку, согласно приказу Минздравсоцразвития от 12 мая 2010 года № 346н⁴, в стандарт оснащения государственных судебно-медицинских учреждений входят рентгеновский аппарат и цифровая мобильная рентгеновская система, то рентгенографические исследования могут проводиться в данном учреждении.

Для КТ- и МРТ-исследований необходимо наличие специальных помещений и соответствующего оборудования. Если речь идёт о крупных бюро судебно-медицинской экспертизы, проводящих исследования как живых лиц, так и тел погибших, то наиболее оптимальным будет расположить кабинет лучевой диагностики с КТ и/или МРТ аппаратом в структуре бюро. Действительно, в Швейцарии в результате совместной деятельности Института судебной медицины и Института диагностической радиологии Бернского университета подобные посмертные КТ-исследования начали проводить с 2000 года [5]. В Институте судебной медицины в Копенгагене (Дания) с 2002 года и в Викторианском институте судебной медицины в Мельбурне (Victorian Institute of Forensic Medicine, Австралия) с 2005 года все поступающие трупы до вскрытия подвергаются посмертной КТ [16, 55]. Интересным вариантом является использование мобильных сканеров, т.е. томографов, расположенных в специальных автомобилях, что позволяет их передвижение и, соответственно, проведение посмертных лучевых исследований вблизи нахождения трупа [56].

В нашей стране проведение любых рентгенологических исследований регламентировано государственными санитарно-эпидемиологическими правилами и нормативами, в частности действующими с 1 мая 2003 года СанПиН 2.6.1.1192-03⁵. Данные правила содержат основные требования и нормы по обеспечению радиационной безопасности персонала, пациентов и населения при проведении медицинских рентгенологических процедур с диагностической, профилактической, терапевтической или исследовательской целью. Дополнительное согласование, в частности, с органами Росздравнадзора, для проведения посмертных рентгенологических исследований не предусмотрено. Видимо, именно поэтому участники круглого стола, являющиеся патологоанатомами, говорили о целесообразности проведения подобных исследований в отделениях лучевой диагностики

главным образом тех медицинских учреждений, в состав которых входит и патологоанатомическое отделение. Высказывались также предложения о возможности использования отдельного помещения со своим входом и оборудованием. Вышепредставленный анализ результатов четырёх анкетирований зарубежных специалистов также свидетельствует о преимущественном использовании тех же самых аппаратов, что используются в клинической работе с живыми пациентами. Однако стоит учесть, что в большинстве таких учреждений поток посмертных исследований организован в утреннее, вечернее или специально отведённое время, когда нет приёма живых пациентов, т.е. соблюден принцип разделения потоков исследуемых.

Несмотря на то, что тела умерших доставляются и подвергаются посмертному лучевому исследованию в герметичных полиэтиленовых пакетах, обязательным моментом таких исследований является проведение, согласно СанПиН 2.6.1.1192-03, влажной уборки стен с мытьём полов и тщательной дезинфекцией элементов и принадлежностей рентгеновского аппарата, а также ежемесячной генеральной уборки путём протирания поверхностей помещения, оборудования и принадлежностей 1–2% раствором уксусной кислоты.

Выбор специалиста для проведения посмертного исследования и анализа полученных результатов

В отношении того, кто должен непосредственно выполнять посмертные лучевые исследования, все участники круглого стола заявили о специалисте по лучевым исследованиям — рентгенолаборанте или враче-рентгенологе. Однако определение вида и объёма посмертного лучевого исследования до вскрытия следует проводить в результате совместного решения врача-рентгенолога и прозектора. Поскольку патологоанатомическое вскрытие проводится после изучения истории болезни, т.е. выяснения клинических особенностей течения и лечения заболевания, а также данных прижизненных лабораторных и инструментальных исследований, то врачу-рентгенологу до проведения лучевого исследования также в обязательном порядке следует предоставлять имеющуюся клиническую информацию. Подтверждением вышесказанному является исследование F. Fernandes с соавт. [57], показавшее, что знание клинической информации повысило диагностическую точность традиционного вскрытия на 8% и минимально инвазивного вскрытия, включающего в себя посмертное лучевое исследование и взятие образцов тканей, на 12%.

⁴ Приказ Министерства здравоохранения и социального развития РФ от 12.05.2010 № 346н «Об утверждении Порядка организации и производства судебно-медицинских экспертиз в государственных судебно-экспертных учреждениях Российской Федерации». Режим доступа: <https://base.garant.ru/12177987/#friends>.

⁵ Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 18.02.2003 № 8 «О введении в действие СанПиН 2.6.1.1192-03». Режим доступа: <https://base.garant.ru/4179018>.

Алгоритм посмертного лучевого исследования в рамках судебно-медицинской экспертизы также следует планировать совместно на основании постановления или определения о назначении экспертизы, данных об обстоятельствах смерти, посмертном периоде, внешнем осмотре тела. Вместе с тем следует указать, что в 2010 году в Республиканском бюро судебно-медицинской экспертизы Министерства здравоохранения Республики Татарстан началась специальная подготовка по лучевой диагностике в интернатуре и на циклах профессионального дополнительного образования врачей-судебно-медицинских экспертов [58].

Солитарное мнение отечественных специалистов — участников круглого стола проявилось и в отношении того, что анализ томограмм, их постобработку, включая 3D-моделирование, также должен проводить врач-рентгенолог. Примечательно, что с юридических позиций врач-рентгенолог не должен иметь каких-либо дополнительных сертификатов, однако такой врач-рентгенолог должен владеть знаниями о динамике развития неспецифических посмертных изменений во внутренних органах и их лучевой семиотике [59, 60]. В этой связи на начальном этапе внедрения посмертных лучевых исследований наиболее оптимальными являются совместный анализ полученных томограмм и формулировка заключения врачом-рентгенологом и врачом-патологоанатомом или судебно-медицинским экспертом [61].

Следует отметить, что в процессе обсуждения особенностей внедрения посмертных лучевых исследований в Российской Федерации возникли дополнительные вопросы. В частности, в каком объеме (полная описательная часть или только заключение) должны фигурировать результаты посмертных лучевых исследований в протоколе патологоанатомического или судебно-медицинского вскрытия и необходимы ли специальные объединённые протоколы. Большинство участников высказалось за необходимость предоставления отдельного полного танаторадиологического протокола с заключением, даже в случаях их несоответствия результатам макро- и микроскопического исследования трупа. При этом прозвучало, что протоколы посмертных лучевых исследований, по аналогии с клиническими рекомендациями, должны быть унифицированными, включая технические параметры аппаратов и режимы сканирования.

Отдельного обсуждения заслуживает вопрос о необходимости/возможности выдачи и объеме результатов посмертных лучевых исследований по запросу родственников.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, данные литературы и мнения российских специалистов указывают на целесообразность и насущную необходимость использования посмертных

лучевых исследований для объективизации и повышения точности традиционных аутопсий. В настоящее время данные исследования следует рассматривать как первый этап патологоанатомического и судебно-медицинского вскрытия.

Залогом эффективного проведения танаторадиологических исследований является тесное сотрудничество врачей-рентгенологов и патологоанатомов или судебно-медицинских экспертов. Именно в результате сотрудничества специалистов и использования имеющегося оборудования возможно определение особенностей проведения посмертного лучевого исследования для получения наиболее эффективного результата в каждом конкретном случае.

При определении места размещения КТ- и/или МРТ-оборудования следует учитывать региональные особенности организации медицинской помощи, а также наличие уже имеющихся аппаратов и врачей-рентгенологов в лечебных учреждениях. Однако для широкого внедрения посмертных лучевых исследований в патологоанатомическую и судебно-медицинскую практику необходимо централизованное решение ряда организационных вопросов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Вклад авторов. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение поисково-аналитической работы и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распределён следующим образом: А.И. Щеголев, У.Н. Туманова — концепция и дизайн статьи, сбор и анализ данных, написание и редактирование текста рукописи, утверждение окончательного варианта статьи.

ADDITIONAL INFORMATION

Funding source. This article was not supported by any external sources of funding.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work. A.I. Shchegolev, U.N. Tumanova — concept and design of the article, data collection and analysis, drafting and revising the work, approval of the final version of the article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Connolly A.J., Finkbeiner W.E., Ursell P.C., Davis R.L. Autopsy pathology: A manual and atlas. 3th ed. Elsevier Inc., 2016. 400 p.
2. Ernst L.M. A pathologist's perspective on the perinatal autopsy // *Semin Perinatol.* 2015. Vol. 39, N 1. P. 55–63. doi: 10.1053/j.semperi.2014.10.008
3. Oluwasola O.A., Fawole O.I., Otegbayo A.J., et al. The autopsy knowledge, attitude, and perceptions of doctors and relatives of the deceased // *Arch Pathol Lab Med.* 2009. Vol. 133, N 1. P. 78–82. doi: 10.5858/133.1.78
4. Levy B. Informatics and autopsy pathology // *Surg Pathol Clin.* 2015. Vol. 8, N 2. P. 159–174. doi: 10.1016/j.path.2015.02.010
5. Thali M.J., Yen K., Schweitzer W., et al. Virtopsy, a new imaging horizon in forensic pathology: Virtual autopsy by postmortem multislice computed tomography (MSCT) and magnetic resonance imaging (MRI): A feasibility study // *J Forensic Sci.* 2003. Vol. 48, N 2. P. 386–403.
6. Eastridge B.J., Mardin M., Cantrell J., et al. Died of wounds on the battlefield: Causation and implications for improving combat casualty care // *J Trauma.* 2011. Vol. 71, N S1. P. 4–8. doi: 10.1097/TA.0b013e318221147b
7. Eastridge B.J., Mabry R.L., Seguin P., et al. Death on the battlefield (2001–2011): Implications for the future of combat casualty care // *J Trauma Acute Care Surg.* 2012. Vol. 73, N 6, Suppl. 5. P. 431–437. doi: 10.1097/TA.0b013e3182755dcc
8. Berran P.J., Mazuchowski E.L., Marzouk A., Harcke H.T. Observational case series: an algorithm incorporating multidetector computerized tomography in the medicolegal investigation of human remains after a natural disaster // *J Forensic Sci.* 2014. Vol. 59, N 4. P. 1121–1125. doi: 10.1111/1556-4029.12422
9. Baglivo M., Winkhofer S., Hatch G.M., et al. The rise of forensic and post-mortem radiology: Analysis of the literature between the year 2000 and 2011 // *J Forensic Radiol Imaging.* 2013. Vol. 1, N 1. P. 3–9. doi: 10.1016/j.jofri.2012.10.003
10. Туманова У.Н. Становление и развитие посмертных лучевых исследований в мире и России // *REJR.* 2020. Т. 10, № 4. С. 250–263. doi: 10.21569/2222-7415-2020-10-4-250-263
11. Arthurs O.J., van Rijn R.R., Sebire N.J. Current status of paediatric post-mortem imaging: An ESPR questionnaire-based survey // *Pediatr Radiol.* 2014. Vol. 44, N 3. P. 244–251. doi: 10.1007/s00247-013-2827-6
12. Shelmerdine S.C., Gerrard C.Y., Rao P., et al. Joint European society of paediatric radiology (ESPR) and international society for forensic radiology and imaging (ISFRI) guidelines: Paediatric postmortem computed tomography imaging protocol // *Pediatr Radiol.* 2019. Vol. 49, N 5. P. 694–701. doi: 10.1007/s00247-018-04340-x
13. Whitby E., Offiah A.C., Shelmerdine S.C., et al. Current state of perinatal postmortem magnetic resonance imaging: European society of paediatric radiology questionnaire-based survey and recommendations // *Pediatr Radiol.* 2021. Vol. 51, N 5. P. 792–799. doi: 10.1007/s00247-020-04905-9
14. Chambers G., Shelmerdine S.C., Aertsen M., et al. Current and future funding streams for paediatric postmortem imaging: European society of paediatric radiology survey results // *Pediatr Radiol.* 2023. Vol. 53, N 2. P. 273–281. doi: 10.1007/s00247-022-05485-6
15. Rutty G.N., Swift B. Accuracy of magnetic resonance imaging in determining cause of sudden death in adults: Comparison with conventional autopsy // *Histopathology.* 2004. Vol. 44, N 2. P. 187–189. doi: 10.1111/j.1365-2559.2004.01741.x
16. O'Donnell C., Rotman A., Collett S., Woodford N. Current status of routine post-mortem CT in Melbourne, Australia // *Forensic Sci Med Pathol.* 2007. Vol. 3, N 3. P. 226–232. doi: 10.1007/s12024-007-9006-8
17. Van Rijn R.R., Beek E.J., van de Putte E.M., et al. The value of postmortem computed tomography in paediatric natural cause of death: A Dutch observational study // *Pediatr Radiol.* 2017. Vol. 47, N 11. P. 1514–1522. doi: 10.1007/s00247-017-3911-0
18. Халиков А.Д., Александрова З.Д., Трофимова Т.Н., и др. Виртуальная аутопсия мертворожденного с пентадой Кантрелла // *Нейрохирургия и неврология детского возраста.* 2009. № 1. С. 14–19.
19. Бывальцев В.А., Степанов И.А., Семенов А.В., и др. Возможности диагностики давности наступления смерти по изменениям в поясничных межпозвонковых дисках (сопоставление морфологических, иммуногистохимических и томографических результатов) // *Судебно-медицинская экспертиза.* 2017. № 4. С. 4–8. doi: 10.17116/sudmed201706044-8
20. Борщевская В.Н., Солонкина А.Д., Глоба И.В. Посмертная компьютерно-томографическая диагностика тромбозмболии легочной артерии в практике судебно-медицинского эксперта (пилотное исследование) // *Материалы II Научно-практической конференции Межрегионального танаториологического общества «Лучевая диагностика для патологической анатомии и судебно-медицинской экспертизы: от прижизненной к посмертной», 7–8 октября. Москва, 2022. С. 118–121. doi: 10.54182/9785988117094_2022_118*
21. Туманова У.Н., Федосеева В.К., Ляпин В.М., и др. Посмертная компьютерная томография мертворожденных с костной патологией // *Медицинская визуализация.* 2013. № 5. С. 110–120.
22. Tumanova U.N., Shchegolev A.I. The role and place of thanatological studies in the pathological examination of fetuses and newborns // *Bull Exp Biol Med.* 2022. Vol. 173, N 6. P. 691–705. doi: 10.1007/s10517-022-05615-y
23. Клевно В.А., Чумакова Ю.В., Дуброва С.Э. Судебно-медицинская экспертиза и посмертная компьютерная томография в случае смерти от механической асфиксии: сложности диагностики // *Судебная медицина.* 2019. № S1. С. 54.
24. Клевно В.А., Чумакова Ю.В. Виртопсия — новый метод исследования в практике отечественной судебной медицины // *Судебная медицина.* 2019. № 2. С. 27–31. doi: 10.19048/2411-8729-2019-5-2-27-31
25. Щеголев А.И., Туманова У.Н. II Научно-практическая конференция Межрегионального танаториологического общества «Лучевая диагностика для патологической анатомии и судебно-медицинской экспертизы: от прижизненной к посмертной» // *Судебная медицина.* 2022. № 4. С. 105–110. doi: 10.17816/fm759
26. Медведев И.И. Основы патологоанатомической техники. 3-е изд., испр. и доп. Москва: Медицина, 1969. 288 с.
27. Туманова У.Н., Федосеева В.К., Ляпин В.М., и др. Плодакардиус: посмертная компьютерная и магнитно-резонансная томография // *Диагностическая и интервенционная радиология.* 2016. Т. 10, № 2. С. 23–30.
28. Туманова У.Н., Ляпин В.М., Буров А.А., и др. VACTERL ассоциация у новорожденного: посмертная КТ и МРТ визуализация при

- патологоанатомическом исследовании // REJR. 2017. Vol. 7, N 2. P. 191–208. doi: 10.21569/2222-7415-2017-7-2-191-208
29. Коков Л.С., Кинле А.Ф., Сеницын В.Е., Филимонов Б.А. Возможности компьютерной и магнитно-резонансной томографии в судебно-медицинской экспертизе механической травмы и скоропостижной смерти (обзор литературы) // Неотложная медицинская помощь. Журнал им. Н.В. Склифосовского. 2015. № 2. С. 16–26.
30. Ковалев А.В., Кинле А.Ф., Коков Л.С., и др. Реальные возможности посмертной лучевой диагностики в практике судебно-медицинского эксперта // Consilium Medicum. 2016. Т. 18, № 13. С. 9–25.
31. Roberts I.S., Benamore R.E., Benbow E.W., et al. Post-mortem imaging as an alternative to autopsy in the diagnosis of adult deaths: A validation study // Lancet. 2012. Vol. 379, N 9811. P. 136–142. doi: 10.1016/S0140-6736(11)61483-9
32. Wijetunga C., O'Donnell C., So T.Y., et al. Injury detection in traumatic death: Postmortem computed tomography vs open autopsy // Forensic Imaging. 2020. N 20. P. 100349. doi: 10.1016/j.jofri.2019.100349
33. Proisy M., Marchand A.J., Loget P., et al. Whole-body post-mortem computed tomography compared with autopsy in the investigation of unexpected death in infants and children // Eur Radiol. 2013. Vol. 23, N 6. P. 1711–1719. doi: 10.1007/s00330-012-2738-1
34. Sieswerda-Hoogendoorn T., Soerdjbalie-Maikoe V., de Bakker H., van Rijn R.R. Postmortem CT compared to autopsy in children; Concordance in a forensic setting // Int J Legal Med. 2014. Vol. 128, N 6. P. 957–965. doi: 10.1007/s00414-014-0964-6
35. Krentz B.V., Alamo L., Grimm J., et al. Performance of post-mortem CT compared to autopsy in children // Int J Legal Med. 2016. Vol. 130, N 4. P. 1089–1099. doi: 10.1007/s00414-016-1370-z
36. Arthurs O.J., Guy A., Thayil S., et al. Comparison of diagnostic performance for perinatal and paediatric post-mortem imaging: CT versus MRI // Eur Radiol. 2016. Vol. 26, N 7. P. 2327–2336. doi: 10.1007/s00330-015-4057-9
37. Whitby E.H., Variend S., Rutter S., et al. Corroboration of in utero MRI using post-mortem MRI and autopsy in fetuses with CNS abnormalities // Clin Radiol. 2004. Vol. 59, N 12. P. 1114–1120. doi: 10.1016/j.crad.2004.04.018
38. Туманова У.Н., Серова Н.С., Щеголев А.И. Применение посмертной МРТ для диагностики поражений головного мозга у плодов и новорожденных // REJR. 2017. Т. 7, № 3. С. 8–22. doi: 10.21569/2222-7415-2017-7-3-8-22
39. Tumanova U.N., Lyapin V.M., Bychenko V.G., et al. Postmortem magnetic resonance imaging in the diagnosis of congenital pneumonia // Bulletin Russ State Med University. 2016. № 4. С. 44–50.
40. Туманова У.Н., Серова Н.С., Быченко В.Г., Щеголев А.И. Возможности посмертных лучевых исследований для оценки поражений легких // REJR. 2018. Т. 8, № 2. С. 198–221. doi: 10.21569/2222-7415-2018-8-2-198-221
41. Tumanova U.N., Lyapin V.M., Bychenko V.G., et al. Potentialities of postmortem magnetic resonance imaging for identification of live birth and stillbirth // Bull Exp Biol Med. 2019. Vol. 167, N 6. P. 823–826. doi: 10.1007/s10517-019-04631-9
42. Туманова У.Н., Ляпин В.М., Быченко В.Г., и др. Посмертная МРТ-характеристика неиммунной водянки плода // Российский электронный журнал лучевой диагностики. 2018. Т. 8, № 4. С. 172–183. doi: 10.21569/2222-7415-2018-8-4-172-18
43. Tumanova U.N., Lyapin V.M., Bychenko V.G., et al. Possibilities of postmortem magnetic resonance imaging for evaluation of anasarca in newborns // Bull Exp Biol Med. 2019;166(5):671–675. doi: 10.1007/s10517-019-04415-1
44. Thayil S., Sebire N.J., Chitty L.S., et al. Post-mortem MRI versus conventional autopsy in fetuses and children: A prospective validation study // Lancet. 2013. Vol. 382, N 9888. P. 223–233. doi: 10.1016/S0140-6736(13)60134-8
45. Grabherr S., Heinemann A., Vogel H., et al. Postmortem CT angiography compared with autopsy: A forensic multicenter study // Radiology. 2018. Vol. 288, N 1. P. 270–276. doi: 10.1148/radiol.2018170559
46. Tumanova U.N., Lyapin V.M., Bychenko V.G., et al. Postmortem computed tomography angiography of newborns // Bull Exp Biol Med. 2020. Vol. 170, N 2. P. 268–274. doi: 10.1007/s10517-020-05049-4
47. Ben-Sasi K., Chitty L.S., Franck L.S., et al. Acceptability of a minimally invasive perinatal/paediatric autopsy: Healthcare professionals' views and implications for practice // Prenat Diagn. 2013. Vol. 33, N 4. P. 307–312. doi: 10.1002/pd.4077
48. Blokker B.M., Weustink A.C., Wagensveld I.M., et al. Conventional autopsy versus minimally invasive autopsy with postmortem MRI, CT, and CT-guided biopsy: Comparison of diagnostic performance // Radiology. 2018. Vol. 289, N 3. P. 658–667. doi: 10.1148/radiol.2018180924
49. Shchegolev A.I., Tumanova U.N. Persistence of SARS-CoV-2 in deceased patients and safe handling of infected bodies // Bulletin of RSMU. 2021. N 3. P. 5–11. doi: 10.24075/brsmu.2021.029
50. Raviraj K.G., Shobhana S.S., Raviraj K.G., et al. Findings and inferences from full autopsies, minimally invasive autopsies and biopsy studies in patients who died as a result of COVID19: A systematic review // Forensic Sci Med Pathol. 2022. Vol. 18, N 3. P. 369–381. doi: 10.1007/s12024-022-00494-1
51. Туманова У.Н., Щеголев А.И., Ковалев А.В. Техническое и методическое обеспечение проведения посмертных лучевых исследований в патологоанатомических отделениях и бюро судебно-медицинской экспертизы // Судебно-медицинская экспертиза. 2021. Т. 64, № 2. С. 51–57.
52. Туманова У.Н., Федосеева В.К., Ляпин В.М., и др. Выявление скоплений газа в телах плодов, мертворожденных и умерших новорожденных при посмертном компьютерно-томографическом исследовании // Consilium Medicum. 2016. Т. 18, № 13. С. 26–33.
53. Туманова У.Н., Ляпин В.М., Щеголев А.И., и др. Эпигнатус у новорожденного: посмертная КТ- и МРТ-визуализация при патологоанатомическом исследовании // REJR. 2017. Т. 7, № 4. С. 90–107. doi: 10.21569/2222-7415-2017-7-4-90-107
54. Туманова У.Н., Ляпин В.М., Козлова А.В., и др. Аневризма вены Галена у новорожденного: посмертная КТ с контрастным усилением сосудов при патологоанатомическом исследовании // REJR. 2019. Т. 9, № 2. С. 260–274. doi: 10.21569/2222-7415-2019-9-2-260-274
55. Poulsen K., Simonsen J. Computed tomography as routine in connection with medico-legal autopsies // Forensic Sci Int. 2007. Vol. 171, N 2-3. P. 190–197. doi: 10.1016/j.forsciint.2006.05.041
56. Фетисов В.А. Преимущества и недостатки вариантов размещения компьютерных томографов для посмертной визуализации (опыт специалистов Великобритании) // Consilium Medicum. 2016. Т. 18, № 13. С. 34–37.
57. Fernandes F., Castillo P., Bassat Q., et al. Contribution of the clinical information to the accuracy of the minimally invasive and the

complete diagnostic autopsy // *Hum Pathol*. 2019. Vol. 85. P. 184–193. doi: 10.1016/j.humpath.2018.10.037

58. Спиридонов В.А. К вопросу развития виртуальной аутопсии в России, или что делать? // *Судебная медицина*. 2016. № 2. С. 93–94.

59. Дуброва С.Э., Филимонов Б.А. Что должен знать клинический рентгенолог об особенностях компьютерной томографии трупа? // *Consilium Medicum*. 2016. Т. 18, № 13. С. 38–47.

REFERENCES

1. Connolly AJ, Finkbeiner WE, Ursell PC, Davis RL. Autopsy pathology: A manual and atlas. 3th ed. Elsevier Inc.; 2016. 400 p.
2. Ernst LM. A pathologist's perspective on the perinatal autopsy. *Semin Perinatol*. 2015;39(1):55–63. doi: 10.1053/j.semperi.2014.10.008
3. Oluwasola OA, Fawole OI, Otegbayo AJ, et al. The autopsy knowledge, attitude, and perceptions of doctors and relatives of the deceased. *Arch Pathol Lab Med*. 2009;133(1):78–82. doi: 10.5858/133.1.78
4. Levy B. Informatics and autopsy pathology. *Surg Pathol Clin*. 2015;8(2):159–174. doi: 10.1016/j.path.2015.02.010
5. Thali MJ, Yen K, Schweitzer W, et al. Virtopsy, a new imaging horizon in forensic pathology: virtual autopsy by postmortem multislice computed tomography (MSCT) and magnetic resonance imaging (MRI): A feasibility study. *J Forensic Sci*. 2003;48(2):386–403.
6. Eastridge BJ, Mardin M, Cantrell J, et al. Died of wounds on the battlefield: Causation and implications for improving combat casualty care. *J Trauma*. 2011;71(S.1):S4–8. doi: 10.1097/TA.0b013e318221147b
7. Eastridge BJ, Mabry RL, Seguin P, et al. Death on the battlefield (2001–2011): Implications for the future of combat casualty care. *J Trauma Acute Care Surg*. 2012;73(6 Suppl 5):S431–437. doi: 10.1097/TA.0b013e3182755dcc
8. Berran PJ, Mazuchowski EL, Marzouk A, Harcke HT. Observational case series: An algorithm incorporating multidetector computerized tomography in the medicolegal investigation of human remains after a natural disaster. *J Forensic Sci*. 2014;59(4):1121–1125. doi: 10.1111/1556-4029.12422
9. Baglivo M, Winkhofer S, Hatch GM, et al. The rise of forensic and post-mortem radiology: Analysis of the literature between the year 2000 and 2011. *J Forensic Radiol Imaging*. 2013;1(1):3–9.
10. Tumanova UN. Formation and development of postmortem radiological research in the world and in Russia. *REJR*. 2020;10(4):250–263. (In Russ). doi: 10.21569/2222-7415-2020-10-4-250-263
11. Arthurs OJ, van Rijn RR, Sebire NJ. Current status of paediatric post-mortem imaging: An ESPR questionnaire-based survey. *Pediatr Radiol*. 2014;44(3):244–251. doi: 10.1007/s00247-013-2827-6
12. Shelmerdine SC, Gerrard CY, Rao P, et al. Joint European society of paediatric radiology (ESPR) and international society for forensic radiology and imaging (ISFRI) guidelines: Paediatric postmortem computed tomography imaging protocol. *Pediatr Radiol*. 2019;49(5):694–701. doi: 10.1007/s00247-018-04340-x
13. Whitby E, Offiah AC, Shelmerdine SC, et al. Current state of perinatal postmortem magnetic resonance imaging: European society of paediatric radiology questionnaire-based survey and recommendations. *Pediatr Radiol*. 2021;51(5):792–799. doi: 10.1007/s00247-020-04905-9
14. Chambers G, Shelmerdine SC, Aertsen M, et al. Current and future funding streams for paediatric postmortem imaging: European

60. Щеголев А.И., Туманова У.Н., Ляпин В.М. Патологоанатомическая оценка давности внутриутробной гибели плода // *Архив патологии*. 2017. Т. 79. № 6. С. 60–65.

61. Туманова У.Н., Щеголев А.И., Ковалев А.В. Организация проведения посмертных лучевых исследований в структуре патологоанатомических отделений и бюро судебно-медицинской экспертизы // *Судебно-медицинская экспертиза*. 2021. Т. 64, № 1. С. 57–63. doi: 10.17116/sudmed20216401157

society of paediatric radiology survey results. *Pediatr Radiol*. 2023;53(2):273–281. doi: 10.1007/s00247-022-05485-6

15. Rutty GN, Swift B. Accuracy of magnetic resonance imaging in determining cause of sudden death in adults: Comparison with conventional autopsy. *Histopathology*. 2004;44(2):187–189. doi: 10.1111/j.1365-2559.2004.01741.x

16. O'Donnell C, Rotman A, Collett S, Woodford N. Current status of routine post-mortem CT in Melbourne, Australia. *Forensic Sci Med Pathol*. 2007;3(3):226–232. doi: 10.1007/s12024-007-9006-8

17. Van Rijn RR, Beek EJ, van de Putte EM, et al. The value of postmortem computed tomography in paediatric natural cause of death: A Dutch observational study. *Pediatr Radiol*. 2017;47(11):1514–1522. doi: 10.1007/s00247-017-3911-0

18. Halikov AD, Alexandrov DZ, Trofimova TN, et al. Virtual autopsy of a stillborn with Cantrell's pentad. *Neurosurgery Neurology Childhood*. 2009;(1):14–19. (In Russ).

19. Byval'tsev VA, Stepanov IA, Semenov AV, et al. The possibilities for diagnostics of prescription of death coming based on the changes in the lumbar intervertebral disks (the comparison of the morphological, immunohistochemical and topographical findings). *Forensic Medical Examination*. 2017;(4):4–8. (In Russ). doi: 10.17116/sudmed20176044-8

20. Borshchevskaya VN, Solonkina AD, Globa IV. Postmortem computed tomographic diagnosis of pulmonary embolism in the practice of a forensic medical expert (pilot study). In: Materials of the II Scientific and practical conference of the Interregional Thanatoradiological Society "Radiation diagnostics for pathological anatomy and forensic medical examination: from lifetime to postmortem", 7–8 October. Moscow; 2022. P. 118–121. (In Russ). doi: 10.54182/9785988117094_2022_118

21. Tumanova UN, Fedoseeva VK, Liapin VM, et al. Postmortem computed tomography of stillborn with bone pathology. *Medical imaging*. 2013;(5):110–120. (In Russ).

22. Tumanova UN, Shchegolev AI. The role and place of thanatoradiological studies in the pathological examination of fetuses and newborns. *Bull Exp Biol Med*. 2022;173(6):691–705. doi: 10.1007/s10517-022-05615-y

23. Klevno VA, Chumakova YV, Dubrova SE. Forensic medical examination and post-mortem computed tomography in case of death from mechanical asphyxia: Diagnostic difficulties. *Forensic Medicine*. 2019;(S1):54. (In Russ).

24. Klevno VA, Chumakova YV. Virtopsy: New method of research in national practice of forensic medicine. *Forensic Medicine*. 2019;5(2):27–31. (In Russ). doi: 10.19048/2411-8729-2019-5-2-27-31

25. Shchegolev AI, Tumanova UN. II Scientific and practical conference of the Interregional Thanatoradiological Society "Radiological diagnostics for pathological anatomy and forensic medicine: From lifetime to postmortem". *Forensic Medicine*. 2022;8(4):105–110. (In Russ). doi: 10.17816/fm759

26. Medvedev II. Fundamentals of pathoanatomical technology. 3rd revised and updated. Moscow: Medicine; 1969. 288 p. (In Russ).
27. Tumanova UN, Fedoseeva VK, Lyapin VM, et al. Acardiac fetus: Postmortem computed and magnetic resonance tomography imaging. *Diagnostic Int Radiol.* 2016;10(2):23–30. (In Russ).
28. Tumanova UN, Lyapin VM, Burov AA, et al. VACTERL association of newborn: Postmortem ct and mri imaging for autopsy. *REJR.* 2017;7(2):191–208. (In Russ). doi: 10.21569/2222-7415-2017-7-2-191-208
29. Kokov LS, Kinle AF, Sinitsyn VY, Filimonov BA. Possibilities of computed tomography and magnetic resonance imaging in forensic medical examination of mechanical trauma and sudden death (a literature review). *Emergency medical care. N.V. Sklifosovsky Magazine.* 2015;(2):16–26. (In Russ).
30. Kovalev AV, Kinle AF, Kokov LS, et al. Actual possibilities of postmortem imaging in forensic medicine practice. *Consilium Medicum.* 2016;18(13):9–25. (In Russ).
31. Roberts IS, Benamore RE, Benbow EW, et al. Post-mortem imaging as an alternative to autopsy in the diagnosis of adult deaths: A validation study. *Lancet.* 2012;379(9811):136–142. doi: 10.1016/S0140-6736(11)61483-9
32. Wijetunga C, O'Donnell C, So TY, et al. Injury detection in traumatic death: Postmortem computed tomography vs open autopsy. *Forensic Imaging.* 2020;(20):100349. doi: 10.1016/j.jofri.2019.100349
33. Proisy M, Marchand AJ, Loget P, et al. Whole-body post-mortem computed tomography compared with autopsy in the investigation of unexpected death in infants and children. *Eur Radiol.* 2013;23(6):1711–1719. doi: 10.1007/s00330-012-2738-1
34. Sieswerda-Hoogendoorn T, Soerdjbalie-Maikoe V, de Bakker H, van Rijn RR. Postmortem CT compared to autopsy in children; Concordance in a forensic setting. *Int J Legal Med.* 2014;128(6):957–965. doi: 10.1007/s00414-014-0964-6
35. Krentz BV, Alamo L, Grimm J, et al. Performance of post-mortem CT compared to autopsy in children. *Int J Legal Med.* 2016;130(4):1089–1099. doi: 10.1007/s00414-016-1370-z
36. Arthurs OJ, Guy A, Thayyil S, et al. Comparison of diagnostic performance for perinatal and paediatric post-mortem imaging: CT versus MRI. *Eur Radiol.* 2016;26(7):2327–2336. doi: 10.1007/s00330-015-4057-9
37. Whitby EH, Variend S, Rutter S, et al. Corroboration of in utero MRI using post-mortem MRI and autopsy in fetuses with CNS abnormalities. *Clin Radiol.* 2004;59(12):1114–1120. doi: 10.1016/j.crad.2004.04.018
38. Tumanova UN, Serova NS, Shchegolev AI. Use of the postmortem MRI for the cerebral lesions diagnosis in the fetuses and newborns. *REJR.* 2017;7(3):8–22. (In Russ). doi: 10.21569/2222-7415-2017-7-3-8-22
39. Tumanova UN, Lyapin VM, Bychenko VG, et al. Postmortem magnetic resonance imaging in the diagnosis of congenital pneumonia. *Bulletin Russ State Med University.* 2016;(4):44–50. (In Russ).
40. Tumanova UN, Serova NS, Bychenko VG, Shchegolev AI. Possibilities of postmortem radiological studies for evaluation of lung lesions. *REJR.* 2018;8(2):198–221. (In Russ). doi: 10.21569/2222-7415-2018-8-2-198-221
41. Tumanova UN, Lyapin VM, Bychenko VG, et al. Potentialities of postmortem magnetic resonance imaging for identification of live birth and stillbirth. *Bull Exp Biol Med.* 2019;167(6):823–826. doi: 10.1007/s10517-019-04631-9
42. Tumanova UN, Lyapin VM, Bychenko VG, et al. Postmortem MRI characteristics of nonimmune fetal hydrops. *REJR.* 2018;8(4):172–183. (In Russ). doi: 10.21569/2222-7415-2018-8-4-172-18
43. Tumanova UN, Lyapin VM, Bychenko VG, et al. Possibilities of postmortem magnetic resonance imaging for evaluation of anasarca in newborns. *Bull Exp Biol Med.* 2019;166(5):671–675. doi: 10.1007/s10517-019-04415-1
44. Thayyil S, Sebire NJ, Chitty LS, et al. Post-mortem MRI versus conventional autopsy in fetuses and children: A prospective validation study. *Lancet.* 2013;382(9888):223–233. doi: 10.1016/S0140-6736(13)60134-8
45. Grabherr S, Heinemann A, Vogel H, et al. Postmortem CT angiography compared with autopsy: A forensic multicenter study. *Radiology.* 2018;288(1):270–276. doi: 10.1148/radiol.2018170559
46. Tumanova UN, Lyapin VM, Bychenko VG, et al. Postmortem computed tomography angiography of newborns. *Bull Exp Biol Med.* 2020;170(2):268–274. doi: 10.1007/s10517-020-05049-4
47. Ben-Sasi K, Chitty LS, Franck LS, et al. Acceptability of a minimally invasive perinatal/paediatric autopsy: Healthcare professionals' views and implications for practice. *Prenat Diagn.* 2013;33(4):307–312. doi: 10.1002/pd.4077
48. Blokker BM, Weustink AC, Wagensveld IM, et al. Conventional autopsy versus minimally invasive autopsy with postmortem MRI, CT, and CT-guided biopsy: Comparison of diagnostic performance. *Radiology.* 2018;289(3):658–667. doi: 10.1148/radiol.2018180924
49. Shchegolev AI, Tumanova UN. Persistence of SARS-CoV-2 in deceased patients and safe handling of infected bodies. *Bulletin of RSMU.* 2021;(3):5–11. doi: 10.24075/brsmu.2021.029
50. Raviraj KG, Shobhana SS, Raviraj KG, et al. Findings and inferences from full autopsies, minimally invasive autopsies and biopsy studies in patients who died as a result of COVID19: A systematic review. *Forensic Sci Med Pathol.* 2022;18(3):369–381. doi: 10.1007/s12024-022-00494-1
51. Tumanova UN, Shchegolev AI, Kovalev AV. Technical and methodological support for postmortem radiation examinations in the pathological departments and the forensic bureau. *Forensic Medical Examination.* 2021;64(2):51–57. (In Russ). doi: 10.17116/sudmed20216402151
52. Tumanova UN, Fedoseeva VK, Lyapin VM, et al. Identification of gas accumulations in the bodies of fetuses, still-borns and dead newborns at postmortem computed tomography study. *Consilium Medicum.* 2016;18(13):26–33. (In Russ).
53. Tumanova UN, Lyapin VM, Shchegolev AI, et al. Epignatus of a newborn: Postmortem CT and MRI imaging for autopsy. *REJR.* 2017;7(4):90–107. (In Russ). doi: 10.21569/2222-7415-2017-7-4-90-107
54. Tumanova UN, Lyapin VM, Kozlova AV, et al. Galen vein aneurysm in a newborn: Postmortem MSCT with contrast enhancement of vessels within the autopsy. *REJR.* 2019;9(2):260–274. (In Russ). doi: 10.21569/2222-7415-2019-9-2-260-274
55. Poulsen K, Simonsen J. Computed tomography as routine in connection with medico-legal autopsies. *Forensic Sci Int.* 2007;171(2-3):190–197. doi: 10.1016/j.forsciint.2006.05.041
56. Fetisov VA. Advantages and disadvantages of CT scanners and their placement options for postmortem cross-sectional imaging (UK specialists experience). *Consilium Medicum.* 2016;18(13):34–37. (In Russ).
57. Fernandes F, Castillo P, Bassat Q, et al. Contribution of the clinical information to the accuracy of the minimally invasive and

the complete diagnostic autopsy. *Hum Pathol.* 2019;(85):184–193. doi: 10.1016/j.humpath.2018.10.037

58. Spiridonov VA. To the question of the development of virtual autopsy in Russia, or what to do? *Forensic Medicine.* 2016;(2):93–94. (In Russ).

59. Dubrova SE, Filimonov BA. Postmortem computed tomography and its features: What should clinical radiologists know? *Consilium Medicum.* 2016;18(13):38–47. (In Russ).

60. Shchegolev AI, Tumanova UN, Lyapin VM. Pathological estimation of the time of fetal death. *Pathology Archive.* 2017;79(6):60–65. (In Russ). doi: 10.17116/patol201779660-65

61. Tumanova UN, Shchegolev AI, Kovalev AV. Organization of postmortem radiological examination in the structure of pathological departments and forensic bureaus. *Forensic Medical Examination.* 2021;64(1):57–63. (In Russ). doi: 10.17116/sudmed20216401157

ОБ АВТОРАХ

*** Щеголев Александр Иванович**, д-р мед. наук, профессор;
адрес: Россия, 117997, Москва, ул. академика Опарина, д. 4;
ORCID: 0000-0002-2111-1530;
eLibrary SPIN: 9061-5983;
e-mail: ashegolev@oparina4.ru

Туманова Ульяна Николаевна, д-р мед. наук;
ORCID: 0000-0002-0924-6555;
eLibrary SPIN: 7555-0987;
e-mail: u.n.tumanova@yandex.ru

AUTHORS' INFO

*** Aleksandr I. Shchegolev**, MD, Dr. Sci. (Med.), Professor;
address: 4 Akademika Oparina street, 117997 Moscow, Russia;
ORCID: 0000-0002-2111-1530;
eLibrary SPIN: 9061-5983;
e-mail: ashegolev@oparina4.ru

Ulyana N. Tumanova, MD, Dr. Sci. (Med.);
ORCID: 0000-0002-0924-6555;
eLibrary SPIN: 7555-0987;
e-mail: u.n.tumanova@yandex.ru

* Corresponding author / Автор, ответственный за переписку

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD430154>

Магнитно-резонансная томография в диагностике редкого генетического заболевания — недержания пигмента (синдром Блоха–Сульцбергера) — на примере клинического случая

И.И. Ярмола¹, А.В. Аникин¹, Д.А. Ганькин², Л.Е. Фомина¹, Н.А. Харитонов¹, И.С. Жанин¹, А.А. Пушков¹, М.А. Басаргина¹, О.Б. Кондакова¹

¹ Национальный медицинский исследовательский центр здоровья детей, Москва, Российская Федерация;

² Щёлковский перинатальный центр, Щёлково, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Недержание пигмента (синдром Блоха–Сульцбергера) — редкое наследственное заболевание, проявляющееся характерными кожными высыпаниями и поражением других органов и систем. Магнитно-резонансная томография является приоритетным методом для визуализации структурной патологии головного мозга и прогноза неврологической манифестации у ребёнка.

Ключевая роль диагностики заболевания недержания пигмента принадлежит дерматологу; подтверждающая диагностика проводится путём молекулярно-генетического анализа гена *IKBKG*.

В представленном клиническом наблюдении у новорождённой девочки с высыпаниями на кожных покровах, типичными для синдрома Блоха–Сульцбергера, и выявленной делецией в гене *IKBKG* проводилась магнитно-резонансная томография головного мозга, где были обнаружены многочисленные очаги ишемии, кровоизлияния и поражение проводящих путей.

Магнитно-резонансная томография головного мозга у пациентов с синдромом Блоха–Сульцбергера используется для оценки тяжести поражения вещества мозга, что позволяет объяснить причину неврологических симптомов, скорректировать реабилитационные мероприятия, а также прогнозировать развитие ребёнка.

Ключевые слова: недержание пигмента; синдром Блоха–Сульцбергера; магнитно-резонансная томография; дегенерация проводящих путей; ген *IKBKG*.

Как цитировать:

Ярмола И.И., Аникин А.В., Ганькин Д.А., Фомина Л.Е., Харитонов Н.А., Жанин И.С., Пушков А.А., Басаргина М.А., Кондакова О.Б. Магнитно-резонансная томография в диагностике редкого генетического заболевания — недержания пигмента (синдром Блоха–Сульцбергера) — на примере клинического случая // *Digital Diagnostics*. 2023. Т. 4, № 3. С. 384–392. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD430154>

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD430154>

Magnetic resonance imaging for diagnosing a rare disease: incontinentia pigmenti (Bloch–Sulzberger syndrome) on the example of a clinical case

Igor I. Yarmola¹, Anatoly V. Anikin¹, Dmitry A. Gankin², Lyubov E. Fomina¹, Nataliya A. Kharitonova¹, Ilya S. Zhanin¹, Alexander A. Pushkov¹, Milana A. Basargina¹, Olga B. Kondakova¹

¹ National Medical Research Center for Children's Health, Moscow, Russian Federation;

² Shchelkovsky Perinatal Center, Schelkovo, Russian Federation

ABSTRACT

Incontinentia pigmenti, also known as Bloch–Sulzberger syndrome, is a rare hereditary disease characterized by typical skin rashes and involvement of other organs and systems. Magnetic resonance imaging stands as the primary method for visualizing the structural pathology of the brain and predicting neurological manifestations in an affected child.

Diagnosing incontinentia pigmenti predominantly falls within the domain of dermatologists; verification is performed by molecular genetic analysis of the *IKBKG* gene. This study involved magnetic resonance imaging of the brain in a patient with skin rashes, characteristic of Bloch–Sulzberger syndrome, and deletion in the *IKBKG* gene, where numerous foci of ischemia, hemorrhages, and lesions of the tracts were detected.

Magnetic resonance imaging of the brain in patients with Bloch–Sulzberger syndrome is used to evaluate the severity of damage to the brain substance, which makes it possible to explain the cause of neurological symptoms and correct habilitation, as well as predict the development of the child.

Keywords: incontinentia pigmenti; Bloch–Sulzberger syndrome; magnetic resonance imaging; white matted tracts degeneration; *IKBKG* gene.

To cite this article:

Yarmola II, Anikin AV, Gankin DA, Fomina LE, Kharitonova NA, Zhanin IS, Pushkov AA, Basargina MA, Kondakova OB. Magnetic resonance imaging for diagnosing a rare disease: incontinentia pigmenti (Bloch–Sulzberger syndrome) on the example of a clinical case. *Digital Diagnostics*. 2023;4(3):384–392. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD430154>

Received: 16.05.2023

Accepted: 29.06.2023

Published: 22.08.2023

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD430154>

磁共振成像在罕见遗传性疾病（即色素失禁症，也称布洛赫-苏兹伯格综合征）诊断中的应用：临床病例

Igor I. Yarmola¹, Anatoly V. Anikin¹, Dmitry A. Gankin², Lyubov E. Fomina¹, Nataliya A. Kharitonova¹, Ilya S. Zhanin¹, Alexander A. Pushkov¹, Milana A. Basargina¹, Olga B. Kondakova¹

¹ National Medical Research Center for Children's Health, Moscow, Russian Federation;

² Shchelkovsky Perinatal Center, Schelkovo, Russian Federation

简评

色素失禁症（布洛克-苏兹伯格综合征，Bloch-Sulzberger Syndrome）是一种罕见的遗传性疾病，表现为特征性皮炎以及其他器官和系统的损坏。磁共振成像是显示出大脑结构病变和预测儿童神经系统表现的优先方法。

皮肤科医生在色素失禁症的诊断中起着关键作用；需要通过对IKBKG基因进行分子遗传分析，以确诊。

一名新生女婴患有典型的布洛赫-苏兹伯格综合征皮炎和IKBKG基因缺失，在进行脑磁共振成像检查后，医生发现了多处缺血、出血和传导通路病变。

布洛赫-苏兹伯格综合征患者的脑磁共振成像可用于评估脑物质损坏的严重程度，这有助于解释神经症状的原因、调整康复措施和预测患儿的发展。

关键词：色素失禁症；布洛克-苏兹伯格综合征；磁共振成像；传导通路变性；IKBKG基因。

引用本文：

Yarmola II, Anikin AV, Gankin DA, Fomina LE, Kharitonova NA, Zhanin IS, Pushkov AA, Basargina MA, Kondakova OB. 磁共振成像在罕见遗传性疾病（即色素失禁症，也称布洛赫-苏兹伯格综合征）诊断中的应用：临床病例. *Digital Diagnostics*. 2023;4(3):384–392.

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD430154>

收到: 16.05.2023

接受: 29.06.2023

发布日期: 22.08.2023

АКТУАЛЬНОСТЬ

Недержание пигмента (OMIM 308300: синдром Блоха–Сульцбергера, недержание пигмента, тип II) — редкое наследственное X-сцепленное заболевание из группы генодерматозов, которое характеризуется поражением кожи, волос, зубов, ногтей, глаз и центральной нервной системы. Заболевание в большинстве случаев проявляется в первые дни или недели жизни.

В мировой литературе описано более 2000 случаев недержания пигмента, и их количество продолжает расти. Распространённость недержания пигмента оценивается в 0,7 случаев на 1 млн человек во всём мире. Частота заболевания на территории Европы — 1,2:100 тыс. новорождённых [1]. Причиной заболевания являются патогенные варианты в гене *IKBKG* (ингибитор каппа-В киназы гамма), расположенном на длинном плече X-хромосомы в локусе Xq28. Ген участвует в регуляции апоптоза, клеточного цикла, воспаления, иммунитета и других путей [2–4].

Для заболевания характерен широкий клинический полиморфизм — от небольшого снижения качества жизни до летальных случаев. Патогенные нуклеотидные варианты в этом гене приводят к структурным изменениям головного мозга [5]. Эти аномалии могут быть выявлены при помощи магнитно-резонансной томографии (МРТ), используемой для диагностики и других наследственных болезней как моногенной [6], так и мультифакториальной природы [7].

Заболевание наследуется по X-сцепленному доминантному типу и является летальным для большинства мальчиков в период эмбриогенеза. Соотношение больных девочек и мальчиков — 20:1.

При недержании пигмента отмечается множественное поражение органов и систем, развивающихся преимущественно из эктодермальной пластинки. Высыпания на коже встречаются в 100% случаев и носят множественный характер. Отличительной особенностью является линейное расположение (по линиям Блашко) пузырей и пустул. У пациентов с недержанием пигмента описаны алопеция, аномалии развития зубов, дистрофия ногтей, а также повышение риска офтальмологической патологии — гиперваскуляризации сетчатки, которая без лечения может приводить к отслоению (как правило, у таких пациентов отслоение происходит в возрасте до 6 лет жизни) [8]. Встречаются также косоглазие, катаракта, атрофия зрительных нервов, пигментная патология сетчатки и микрофтальм. Центральная нервная система, по данным разных авторов, поражается в 10–30% случаев [9] и проявляется судорогами различной степени тяжести (описаны случаи от единичного судорожного приступа до хронической эпилепсии), снижением когнитивных способностей, задержкой развития, спастическими парезами. Реже встречаются аплазия молочных желёз, дополнительные соски, первичная лёгочная гипертензия, лейкоцитоз и другие, более редкие патологические состояния.

Заболевание диагностируют молекулярно-генетическими методами, которые выявляют патогенные генетические варианты в гене *IKBKG*, а также с помощью гистологического исследования биоптатов кожи. Существуют и клинические критерии [10], которые позволяют заподозрить недержание пигмента.

Лечение носит симптоматический, превентивный характер и направлено на предотвращение кожных инфекций, отслойки сетчатки, купирование эпилептических приступов. Показаны имплантация и коррекция форм при поражении зубов, реабилитация при наличии спастических проявлений или парезов.

ОПИСАНИЕ КЛИНИЧЕСКОГО СЛУЧАЯ

Ребёнок Л. (девочка) в возрасте 14 дней поступила в отделение патологии новорождённых и детей раннего детского возраста ФГАУ «НМИЦ здоровья детей» Минздрава России.

Пrenатальный анамнез. Беременность протекала с угрозой прерывания в I и II триместрах вследствие инфицирования цитомегаловирусом (подтверждено методом полимеразной цепной реакции) в I триместре; проводилось стационарное лечение матери. В III триместре мама трижды болела острыми респираторными вирусными инфекциями, дважды появлялись герпетические высыпания.

Роды вторые, срочные, самопроизвольные на сроке гестации 38 недель; масса тела при рождении 3470 г, рост 53 см, оценка по шкале Апгар 9/9 баллов.

После рождения общее состояние удовлетворительное. Определялась распространённая экзантема по всему туловищу, лицу и конечностям (рис. 1). Область волосистой части головы свободна от высыпаний. Лабораторные показатели в пределах возрастной нормы, маркеры воспаления отсутствовали.

С четвёртых суток жизни отмечалось ухудшение общего состояния: появление цианотичных пятен на ногах и руках, иктеричности кожных покровов с сероватым оттенком, ослабление дыхания со склонностью к тахипное, низкое насыщение крови кислородом (сатурация, SpO₂) — 81–95%, развитие гипервозбудимости при осмотре и угнетения сознания в покое, гипертенуса мышц верхних и нижних конечностей, запрокидывания головы назад, судорог.

Отмечены изменения в анализах крови: снижение кислотности крови (pH) до 7,242, повышение лактата крови до 6,4 ммоль/л, снижение концентрации гидрокарбоната (HCO₃⁻) до 16,7 ммоль/л (метаболический ацидоз).

При осмотре дерматологом отмечена динамика в виде регрессии очагов на коже с формированием пигментации коричневатого и светло-розового цвета линейной формы, с переходом в гипопигментацию при дальнейшем наблюдении. Выставлен предварительный диагноз: «Синдром Блоха–Сульцбергера».



Рис. 1. Везикулы, распространяющиеся по линиям Блашко.

Молекулярно-генетическое исследование было направлено на поиск делеции экзонов 4–10 в гене *IKBKG* методом мультиплексной аллельспецифичной полимеразной цепной реакции с использованием праймеров, описанных в статье М.Н. Нагве и соавт. [11]. В результате исследования обнаружена гетерозиготная делеция экзонов 4–10 в гене *IKBKG*, описанная в базе данных мутаций генов человека Human Gene Mutation Database (HGMD) Professional у пациентов с синдромом Блоха–Сульцбергера. Данный нуклеотидный вариант является одним из самых распространённых при недержании пигмента и встречается у 65% пациентов [12].

На четвёртые сутки жизни состояние ребёнка оценивалось как среднетяжёлое в связи с синдромом угнетения центральной нервной системы. По результатам нейросонографии, эхо-признаки диффузных ишемических изменений паренхимы, парасагиттальные и перивентрикулярные множественные очаговые изменения.

Магнитно-резонансная томография (МРТ) проведена на седьмые сутки: выявлены распространённые участки мелкоочагового поражения вещества больших полушарий с вторичным вовлечением проводящих путей — мозолистого тела и кортикоспинальных трактов. Изменения расценены как последствия множественных инфарктов головного мозга в рамках заболевания недержания пигмента (синдром Блоха–Сульцбергера).

ОБСУЖДЕНИЕ

Генетический дефект при синдроме Блоха–Сульцбергера приводит к повышенной уязвимости клеток — эмбриональных производных эктодермальной пластинки — в виде

апоптоза при воздействии цитокинов [13]. К таким тканям относятся кожные покровы с их дериватами (ногти, волосы, зубы), а также нервная система. Манифестация заболевания обычно происходит в первые десять суток жизни, однако младенец может родиться с любой стадией: в этом случае предполагается, что предыдущие стадии произошли внутриутробно.

У пациента Л. манифестация заболевания произошла в первые сутки жизни, типично, с появления кожных высыпаний линейного характера, которые с течением времени претерпевали характерный патоморфоз, соответствующий стадиям заболевания, в сочетании с неврологической симптоматикой.

При МРТ головного мозга были выявлены множественные мелкие (минимальный размер 2 мм) очаги с ограничением диффузии, которые располагались хаотично в глубоком белом веществе, в коре и субкортикально, в мозолистом теле, заднем бедре внутренней капсулы, в ножках мозга, а также по ходу кортикоспинальных и других трактов (рис. 2). Изменения проводящих путей могут рассматриваться как прямое поражение при недержании пигмента либо как проявление ранней Валлеровской (пре-Валлеровской) дегенерации. Последняя представляет собой повреждение проводящих трактов из-за гибели аксона и распада миелиновой оболочки [14]. Мелкие участки с ограничением диффузии расценивались нами как некроз ткани (инфаркты).

В литературе описаны механизмы мелкоочаговых инфарктов мозга, связанных с повреждением стенки сосудов среднего и мелкого калибра, что приводило к микрокровоизлияниям, тромбозам; описаны также случаи массивного двустороннего геморрагического некроза с генерализованным разрушением тканей головного мозга [15].

В представленном нами случае на МРТ головного мозга среди множества очагов были выявлены лишь несколько участков с элементами геморрагической трансформации, соответствующие зонам ишемии (рис. 3, а). Это означает, что не все ишемические очаги осложнились кровоизлияниями. Участки некроза в дальнейшем трансформируются в зоны энцефаломалиции, однако часть минимально поражённых участков может восстановиться практически полностью вплоть до нормальной структуры вещества мозга на МРТ [16]. В области коры и на границе белого и серого вещества в лобных и теменных долях отмечались участки повышенного сигнала на T1-взвешенных изображениях (см. рис. 3, б). Такие участки имеют сходство с кортикальным некрозом, который возникает при ишемическом повреждении коры и приводит к моноцитарной инфильтрации и фагоцитозу клеточных фрагментов, повреждённых структур. Повышение сигнала на T1 происходит из-за отложения денатурированного белка умерших клеток и/или макрофагов, насыщенных липидами [17].

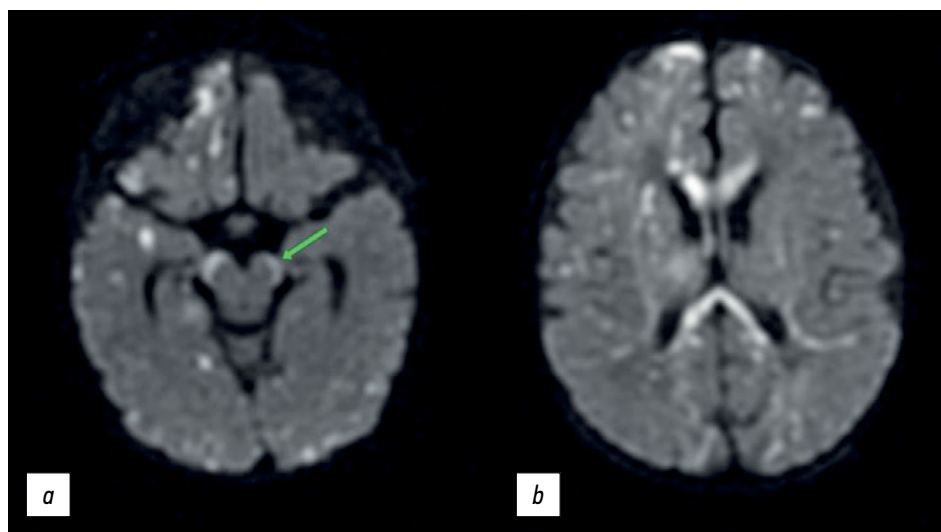


Рис. 2. Диффузионно-взвешенные изображения головного мозга в аксиальной плоскости: *a* — стрелкой указано повышение сигнала от проводящих путей в ножках мозга; *b* — множественные очаги и поражение мозолистого тела.

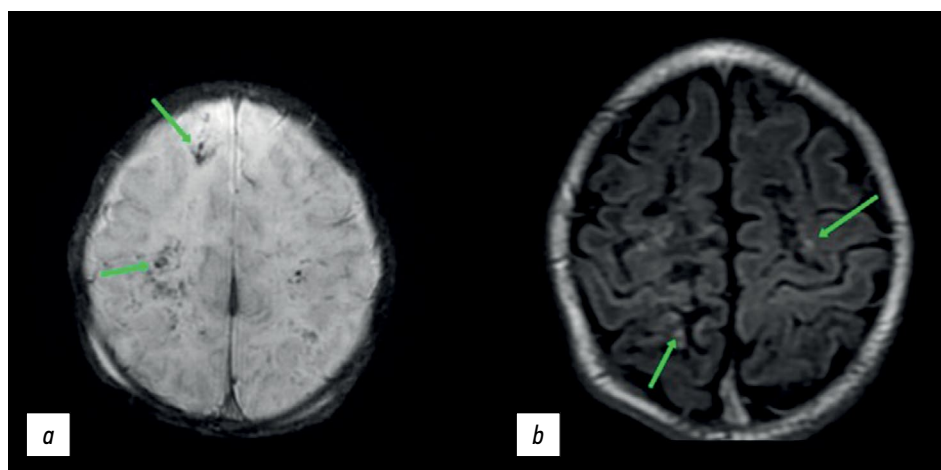


Рис. 3. Магнитно-резонансная томография головного мозга: *a* — SWI-изображения (взвешенные по магнитной восприимчивости) (стрелками указаны участки микрокровоизлияний); *b* — T1-взвешенные изображения (стрелками указаны гиперинтенсивные участки кортикального некроза).

Кроме того, в литературе описаны гистологически подтверждённые случаи воспалительных изменений мягкой паутинной оболочки и головного мозга с наличием клеточной (эозинофильной) инфильтрации у пациентов с недержанием пигмента, напоминающие инфекционное поражение без явных сосудистых нарушений [18].

Дифференциальная диагностика по данным МРТ проводится прежде всего с энцефалитом и перинатальным ишемически-гипоксическим поражением. Для энцефалита характерно преимущественное поражение коры в виде малопротяжённых-протяжённых зон повышения МР-сигнала на T2-ВИ с возможным ограничением или усилением диффузии, в то время как при недержании пигмента происходит хаотичное мелкоочаговое поражение, локализованное в большей степени в белом веществе. Перинатальная ишемия проявляется соответственно паттернам структурной зрелости мозга, для доношенных детей характерны поражение в виде перивентрикулярной

лейкомаляции, поражение базальных ганглиев либо инфаркты, соответствующие артериальным бассейнам. Дифференциальная диагностика с эмболическими инфарктами затруднительна и требует комплексного подхода с изучением анамнеза и осмотром пациента.

Везикулярная стадия сыпи и манифестация неврологических проявлений может быть ошибочно принята за проявления герпетической инфекции. В таком случае совокупность находок на МРТ, характерные кожные высыпания со стадийным патоморфозом и отрицательный анализ на герпесвирусную инфекцию с высокой вероятностью позволяют заподозрить недержание пигмента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ключевая роль диагностики заболевания недержания пигмента принадлежит дерматологу из-за специфического характера высыпаний на коже и их стадийности.

Важную роль в подтверждающей диагностике играет молекулярно-генетический анализ гена *IKBKG*.

МРТ головного мозга у пациентов с синдромом Блоха–Сульцбергера является приоритетным методом для оценки тяжести поражения вещества мозга при возникновении неврологической симптоматики. Метод является безопасным для динамического наблюдения, позволяет объективно оценить реабилитационный потенциал, скорректировать реабилитационные мероприятия, а также спрогнозировать развитие ребёнка.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении работы.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение работы и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распределён следующим образом: И.И. Ярмола — написание текста рукописи, составление плана статьи, анализ диагностических изображений; А.В. Аникин — редактирование статьи, аналитическая работа, обсуждение результатов, одобрение и направление рукописи на рассмотрение; Д.А. Ганькин — редактирование текста статьи, обсуждение результатов; Л.Е. Фомина — редактирование текста статьи; Н.А. Харитоновна, М.А. Басаргина — одобрение и направление рукописи на рассмотрение к публикации; И.С. Жанин,

А.А. Пушков — редактирование текста статьи, проведение молекулярно-генетического анализа; О.Б. Кондакова — редактирование текста статьи, генетическая консультация пациента.

Информированное согласие на публикацию. Авторы получили письменное согласие законных представителей пациента на публикацию медицинских данных и фотографий в журнале Digital Diagnostics.

ADDITIONAL INFORMATION

Funding source. This article was not supported by any external sources of funding.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work. I.I. Yarmola — writing text of the article, planning article structure, imaging analysis; A.V. Anikin — editing of the article, analytical work, discussion of the results, read and approved the direction of the manuscript for publication; D.A. Gankin — editing the text of the article, discussion of the results; L.E. Fomina — edition of the text of the article; N.A. Kharitonova — read and approved the direction of the manuscript for publication; I.S. Zhanin, A.A. Pushkov — article editing, conducting molecular genetic analysis; O.B. Kondakova — article editing, genetic counseling of the patient.

Consent for publication. Written consent was obtained from the patient's parents for publication of relevant medical information and all of accompanying images within the manuscript in Digital Diagnostics journal.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Scheuerle A.E., Ursini M.V., Adam M.P., et al. Incontinentia pigmenti. In: GeneReviews [Internet], Seattle (WA): University of Washington, Seattle, 1993.
2. Fusco F. Molecular analysis of the genetic defect in a large cohort of IP patients and identification of novel NEMO mutations interfering with NF- κ B activation // Hum Mol Genet. 2004. Vol. 13, N 16. P. 1763–1773. doi: 10.1093/hmg/ddh192
3. Yadlapati S., Tripathy K. Incontinentia pigmenti (Bloch Sulzberger Syndrome). In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing, 2023.
4. Савостьянов К.В. Современные алгоритмы генетической диагностики редких наследственных болезней у российских пациентов. Москва: Полиграфист и издатель, 2022. 451 с.
5. Minić S., Cerovac N., Novaković I., et al. The impact of the IKBKG gene on the appearance of the corpus callosum abnormalities in incontinentia pigmenti // Diagnostics. 2023. Vol. 13, N 7. P. 1300. doi: 10.3390/diagnostics13071300
6. Chistiakov D.A., Savostanov K.V., Kuzenkova L.M., et al. Molecular characteristics of patients with glycosaminoglycan storage disorders in Russia // Clin Chim Acta. 2014. N 436. P. 112–120. doi: 10.1016/j.cca.2014.05.010
7. Chistyakov D.A., Savostanov K.V., Nosikov V.V., Turakulov R.I. Genetic determinants of Graves' disease // Mol Gen Metabol. 2000. Vol. 71, N 1–2. P. 66–69. doi: 10.1006/mgme.2000.3042
8. Meuwissen M.E., Mancini G.M. Neurological findings in incontinentia pigmenti: A review // Eur J Med Genet. 2012. Vol. 55, N 5. P. 323–331. doi: 10.1016/j.ejmg.2012.04.007
9. Carney R.G. Incontinentia pigmenti. A world statistical analysis // Arch Dermatol. 1976. Vol. 112, N 4. P. 535–542.
10. Minić S., Trpinac D., Obradović M. Incontinentia pigmenti diagnostic criteria update // Clin Genet. 2014. Vol. 85, N 6. P. 536–542. doi: 10.1111/cge.12223
11. Haque M.N., Ohtsubo M., Nishina S., et al. Analysis of IKBKG/NEMO gene in five Japanese cases of incontinentia pigmenti with retinopathy: Fine genomic assay of a rare male case with mosaicism // J Hum Genet. 2021. Vol. 66, N 2. P. 645–645. doi: 10.1038/s10038-020-00836-3
12. Kawai M., Kato T., Tsutsumi M., et al. Molecular analysis of low-level mosaicism of the IKBKG mutation using the X Chromosome

Inactivation pattern in Incontinentia Pigmenti // *Mol Genet Genomic Med*. 2020. Vol. 8, N 12. P. e1531. doi: 10.1002/mgg3.1531

13. Tak P.P., Firestein G.S. NF- κ B: A key role in inflammatory diseases // *J Clin Invest*. 2001. Vol. 107, N 1. P. 7–11. doi: 10.1172/JCI11830

14. Kleinman J.T. Early Wallerian degeneration on magnetic resonance imaging: Underappreciated but highly relevant // *Dev Med Child Neurol*. 2013. Vol. 55, N 2. P. 104–105. doi: 10.1111/dmcn.12022

15. Salamon S.A., Lichtenbelt K., Cowan F.M., et al. Clinical presentation and spectrum of neuroimaging findings in newborn infants with incontinentia pigmenti // *Dev Med Child Neurol*. 2016. Vol. 58, N 10. P. 1076–1084. doi: 10.1111/dmcn.13140

REFERENCES

1. Scheuerle AE, Ursini MV, Adam MP, et al. Incontinentia Pigmenti. In: *GeneReviews* [Internet], Seattle (WA): University of Washington, Seattle; 1993.

2. Fusco F. Molecular analysis of the genetic defect in a large cohort of IP patients and identification of novel NEMO mutations interfering with NF- κ B activation. *Hum Mol Genet*. 2004;13(16):1763–1773. doi: 10.1093/hmg/ddh192

3. Yadlapati S, Tripathy K. Incontinentia pigmenti (Bloch Sulzberger Syndrome). In: *StatPearls* [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2023.

4. Savostyanov KV. Modern algorithms of genetic diagnosis of rare hereditary diseases in Russian patients. Moscow: Polygraphist Publisher; 2022. 451 p. (In Russ).

5. Minić S, Cerovac N, Novaković I, et al. The impact of the IKBKG gene on the appearance of the corpus callosum abnormalities in incontinentia pigmenti. *Diagnostics*. 2023;13(7):1300. doi: 10.3390/diagnostics13071300

6. Chistiakov DA, Savostyanov KV, Kuzenkova LM, et al. Molecular characteristics of patients with glycosaminoglycan storage disorders in Russia. *Clin Chim Acta*. 2014;436(1):112–120. doi: 10.1016/j.cca.2014.05.010

7. Chistyakov DA, Savostyanov KV, Nosikov VV, Turakulov RI. Genetic determinants of Graves' disease. *Mol Gen Metabol*. 2000;71(1-2):66–69. doi: 10.1006/mgme.2000.3042

8. Meuwissen ME, Mancini GM. Neurological findings in incontinentia pigmenti: A review. *Eur J Med Genet*. 2012;55(5):323–331. doi: 10.1016/j.ejmg.2012.04.007

9. Carney RG. Incontinentia pigmenti. A world statistical analysis. *Arch Dermatol*. 1976;112(4):535–542.

ОБ АВТОРАХ

* Ярмола Игорь Игоревич;

адрес: Россия, 119991, Москва, Ломоносовский проспект,
д. 2, стр. 1;
ORCID: 0000-0002-1272-5119;
eLibrary SPIN: 5591-8066;
e-mail: Lord_Dukich@bk.ru

Аникин Анатолий Владимирович, канд. мед. наук;

ORCID: 0000-0003-0362-6511;
eLibrary SPIN: 7592-1352;
e-mail: anikacor@gmail.com

16. Lou H., Zhang L., Xiao W., et al. Nearly completely reversible brain abnormalities in a patient with incontinentia pigmenti // *Am J Neuroradiol*. 2008. Vol. 29, N 3. P. 431–433. doi: 10.3174/ajnr.A0890

17. Kinoshita T., Ogawa T., Yoshida Y., et al. Curvilinear T1 hyperintense lesions representing cortical necrosis after cerebral infarction // *Neuroradiology*. 2005. Vol. 47, N 7. P. 647–651. doi: 10.1007/s00234-005-1398-0

18. Hauw J.J., Perié G., Bonnette J., Escourolle R. [Neuropathological study of incontinentia pigmenti. Anatomical case report (author's transl). (In French)] // *Acta Neuropathol*. 1977. Vol. 38, N 2. P. 159–162. doi: 10.1007/BF00688564

10. Minić S, Trpinac D, Obradović M. Incontinentia pigmenti diagnostic criteria update. *Clin Genet*. 2014;85(6):536–542. doi: 10.1111/cge.12223

11. Haque MN, Ohtsubo M, Nishina S, et al. Analysis of IKBKG/NEMO gene in five Japanese cases of incontinentia pigmenti with retinopathy: Fine genomic assay of a rare male case with mosaicism. *J Hum Genet*. 2021;66(2):645–645. doi: 10.1038/s10038-020-00836-3

12. Kawai M, Kato T, Tsutsumi M, et al. Molecular analysis of low-level mosaicism of the IKBKG mutation using the X Chromosome Inactivation pattern in Incontinentia Pigmenti. *Mol Genet Genomic Med*. 2020;8(12):e1531. doi: 10.1002/mgg3.1531

13. Tak PP, Firestein GS. NF- κ B: A key role in inflammatory diseases. *J Clin Invest*. 2001;107(1):7–11. doi: 10.1172/JCI11830

14. Kleinman J.T. Early Wallerian degeneration on magnetic resonance imaging: Underappreciated but highly relevant. *Dev Med Child Neurol*. 2013;55(2):104–105. doi: 10.1111/dmcn.12022

15. Salamon SA, Lichtenbelt K, Cowan FM, et al. Clinical presentation and spectrum of neuroimaging findings in newborn infants with incontinentia pigmenti. *Dev Med Child Neurol*. 2016;58(10):1076–1084. doi: 10.1111/dmcn.13140

16. Lou H, Zhang L, Xiao W, et al. Nearly completely reversible brain abnormalities in a patient with incontinentia pigmenti. *Am J Neuroradiol*. 2008;29(3):431–433. doi: 10.3174/ajnr.A0890

17. Kinoshita T, Ogawa T, Yoshida Y, et al. Curvilinear T1 hyperintense lesions representing cortical necrosis after cerebral infarction. *Neuroradiology*. 2005;47(7):647–651. doi: 10.1007/s00234-005-1398-0

18. Hauw JJ, Perié G, Bonnette J, Escourolle R. [Neuropathological study of incontinentia pigmenti. Anatomical case report (author's transl). (In French)]. *Acta Neuropathol*. 1977;38(2):159–162. doi: 10.1007/BF00688564

AUTHORS' INFO

* Igor I. Yarmola;

address: 2/1 Lomonosovsky prospekt, 119991
Moscow, Russia;
ORCID: 0000-0002-1272-5119;
eLibrary SPIN: 5591-8066;
e-mail: Lord_Dukich@bk.ru

Anatoly V. Anikin, MD, Cand. Sci. (Med.);

ORCID: 0000-0003-0362-6511;
eLibrary SPIN: 7592-1352;
e-mail: anikacor@gmail.com

* Corresponding author / Автор, ответственный за переписку

Ганькин Дмитрий Александрович;

ORCID: 0009-0001-6779-8702;

e-mail: ganja-nn@yandex.ru

Фомина Любовь Евгеньевна;

ORCID: 0000-0002-3838-3284;

eLibrary SPIN: 1298-8350;

e-mail: love.fomina@mail.ru

Харитонов Наталья Александровна, канд. мед. наук;

ORCID: 0000-0002-6912-1471;

eLibrary SPIN: 7379-8269;

e-mail: Kharitonova.na@nczd.ru

Жанин Илья Сергеевич, канд. мед. наук;

ORCID: 0000-0003-1423-0379;

eLibrary SPIN: 6108-2016;

e-mail: zhanin.is@nczd.ru

Пушков Александр Алексеевич, канд. биол. наук;

ORCID: 0000-0001-6648-2063;

eLibrary SPIN: 2928-5764;

e-mail: pushkov.aa@nczd.ru

Басаргина Милана Александровна, канд. мед. наук;

ORCID: 0000-0003-2075-6668;

eLibrary SPIN: 5504-7154;

e-mail: basargina.ma@nczd.ru

Кондакова Ольга Борисовна, канд. мед. наук;

ORCID: 0000-0002-6316-9992;

eLibrary SPIN: 9066-3698;

e-mail: kondakova.ob@nczd.ru

Dmitry A. Gankin;

ORCID: 0009-0001-6779-8702;

e-mail: ganja-nn@yandex.ru

Lyubov E. Fomina;

ORCID: 0000-0002-3838-3284;

eLibrary SPIN: 1298-8350;

e-mail: love.fomina@mail.ru

Nataliya A. Kharitonova, MD, Cand. Sci. (Med.);

ORCID: 0000-0002-6912-1471;

eLibrary SPIN: 7379-8269;

e-mail: Kharitonova.na@nczd.ru

Ilya S. Zhanin, MD, Cand. Sci. (Med.);

ORCID: 0000-0003-1423-0379;

eLibrary SPIN: 6108-2016;

e-mail: zhanin.is@nczd.ru

Alexander A. Pushkov, Cand. Sci. (Biol.);

ORCID: 0000-0001-6648-2063;

eLibrary SPIN: 2928-5764;

e-mail: pushkov.aa@nczd.ru

Milana A. Basargina, MD, Cand. Sci. (Med.);

ORCID: 0000-0003-2075-6668;

eLibrary SPIN: 5504-7154;

e-mail: basargina.ma@nczd.ru

Olga B. Kondakova, MD, Cand. Sci. (Med.);

ORCID: 0000-0002-6316-9992;

eLibrary SPIN: 9066-3698;

e-mail: kondakova.ob@nczd.ru

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD472068>

Компьютерная томография в диагностике лихорадки неясного генеза: описание случая

Ю.Ф. Шумская¹, Н.В. Костикова², Д.А. Ахмедзянова¹, М.М. Сулейманова²,
Е.В. Фоминых², М.Г. Мнацаканян², Р.В. Решетников¹

¹ Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий, Москва, Российская Федерация;

² Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова (Сеченовский Университет),
Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Под маской лихорадки неясного генеза могут протекать более двухсот заболеваний. Позитронно-эмиссионная томография, совмещённая с компьютерной томографией, является информативным, но не всегда доступным методом диагностики причин лихорадки неясного генеза. В данной работе представлен случай пациентки с лихорадкой неясного генеза, у которой данные компьютерной томографии сыграли ключевую роль в диагностике гигантоклеточного артериита.

Пациентка, 61 год, с жалобами на повышение температуры тела в вечерние часы до 39,5°C, боли в прекардиальной и межлопаточной областях, снижение массы тела на 10 кг за 3 месяца. В рамках дифференциально-диагностического поиска исключены инфекционные и лимфопролиферативные заболевания. Как причина лихорадки неясного генеза рассматривался эрозивный колит, ранее выявленный при эндоскопическом исследовании, по поводу чего пациентка была госпитализирована в гастроэнтерологическое отделение. При повторной колоноскопии наблюдалась нормальная эндоскопическая картина. По данным компьютерной томографии органов грудной клетки и брюшной полости с внутривенным контрастированием выявлено выраженное утолщение стенок аорты и её ветвей с активным накоплением контрастного вещества, что являлось отражением высокоактивного артериита. В рамках дополнительного обследования исключён специфический артериит. Диагноз сформулирован как гигантоклеточный артериит с поражением брахиоцефального ствола, подключичных артерий, чревного ствола. Пациентке назначен преднизолон с последующим регрессом клинической симптоматики.

Несмотря на то, что компьютерная томография не является золотым стандартом в диагностике лихорадки неясного генеза, применение данного метода в рамках комплексного обследования позволило установить окончательный диагноз пациентке с неклассическим течением гигантоклеточного артериита и длительно существующей лихорадкой неясного генеза.

Ключевые слова: лихорадка неясного генеза; компьютерная томография; гигантоклеточный артериит; описание случая.

Как цитировать:

Шумская Ю.Ф., Костикова Н.В., Ахмедзянова Д.А., Сулейманова М.М., Фоминых Е.В., Мнацаканян М.Г., Решетников Р.В. Компьютерная томография в диагностике лихорадки неясного генеза: описание случая // *Digital Diagnostics*. 2023. Т. 4, № 3. С. 393–402. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD472068>

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD472068>

Computed tomography in the diagnosis of fever of unknown origin: A case report

Yuliya F. Shumskaya¹, Nina V. Kostikova², Dina A. Akhmedzyanova¹, Maria M. Suleymanova², Ekaterina V. Fominykh², Marina G. Mnatsakanyan², Roman V. Reshetnikov¹

¹ Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies, Moscow, Russian Federation;

² The First Sechenov Moscow State Medical University (Sechenov University), Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Fever of unknown origin can be a symptom of at least 200 diseases. Positron emission tomography-computed tomography, although highly informative, may not be readily available as an imaging tool. We present a clinical case of giant cell arteritis where computed tomography played a key role in arriving at a diagnosis.

A 61-year-old woman presented to the hospital with a nocturnal fever up to 39.5°C, accompanied by chest and scapular pain, and substantial weight loss (10 kg over 3 months). Lymphoproliferative and infectious diseases were excluded. Baseline colonoscopy had revealed erosions in the colonic mucosa, leading to a preliminary diagnosis of ulcerative colitis, and subsequently, the patient was admitted to the gastroenterology department. Follow-up colonoscopy had excluded this diagnosis. Additional imaging via chest and abdominal computed tomography scan revealed wall thickening of aorta and its branches with subtle contrast enhancement.

Conditions, such as tuberculous aortoarteritis and syphilitic aortitis, were excluded. The patient was diagnosed with giant cell arteritis involving brachiocephalic trunk, subclavian arteries, and celiac trunk. Prednisolone was administered with subsequent reduction in symptoms.

Although computed tomography may not be regarded as the gold standard for the differential diagnosis of fever of unknown origin, this case underscores its valuable contribution in establishing a definitive diagnosis.

Keywords: fever of unknown origin; tomography; X-ray computed; giant cell arteritis; case report.

To cite this article:

Shumskaya YuF, Kostikova NV, Akhmedzyanova DA, Suleymanova MM, Fominykh EV, Mnatsakanyan MG, Reshetnikov RV. Computed tomography in the diagnosis of fever of unknown origin: A case report. *Digital Diagnostics*. 2023;4(3):393–402. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD472068>

Received: 02.06.2023

Accepted: 04.07.2023

Published: 23.08.2023

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD472068>

电子计算机断层扫描在不明原因发热诊断中的应用： 病例描述

Yuliya F. Shumskaya¹, Nina V. Kostikova², Dina A. Akhmedzyanova¹, Maria M. Suleymanova², Ekaterina V. Fominykh², Marina G. Mnatsakanyan², Roman V. Reshetnikov¹

¹ Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies, Moscow, Russian Federation;

² The First Sechenov Moscow State Medical University (Sechenov University), Moscow, Russian Federation

简评

有两百多种疾病可以在不明原因发热的掩盖下发生。正电子发射断层扫描结合电子计算机断层扫描是诊断不明原因发热的一种信息丰富但并非总是可用的方法。本文介绍一例不明原因发热的女性患者，CT数据在她巨细胞动脉炎的诊断中发挥了关键作用。

一名61岁的女性患者，主诉傍晚体温升高至39.5°C，心前区和肩胛间区疼痛，体重在3个月内下降了10kg。在进行鉴别诊断时，排除了感染性疾病和淋巴增生性疾病。作为不明原因发热的原因，考虑了溃疡性结肠炎，该病曾在内窥镜检查中被发现，患者因此在消化科住院治疗。再次结肠镜检查显示了，内窥镜检查结果正常。通过静脉注射造影剂对胸腔和腹腔进行了电子计算机断层扫描，发现了主动脉及其分支的管壁明显增厚，造影剂积聚活跃，这反映了高度活跃的动脉炎。其他检查排除了特异性动脉炎。诊断结果为巨细胞动脉炎，并累及头臂干、锁骨下动脉和腹腔动脉干。医生给病人开了泼尼松龙，随后临床症状有所缓解。虽然电子计算机断层扫描不是诊断不明原因发热的金标准，但在综合检查框架内使用这种方法，最终允许了对一名患有非典型巨细胞动脉炎病程和长期不明原因发热的患者确诊。

关键词：不明原因的发热；电子计算机断层扫描；巨细胞动脉炎；病例描述。

引用本文：

Shumskaya YuF, Kostikova NV, Akhmedzyanova DA, Suleymanova MM, Fominykh EV, Mnatsakanyan MG, Reshetnikov RV. 电子计算机断层扫描在不明原因发热诊断中的应用：病例描述. *Digital Diagnostics*. 2023;4(3):393–402. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD472068>

收到: 02.06.2023

接受: 04.07.2023

发布日期: 23.08.2023

АКТУАЛЬНОСТЬ

Более двухсот заболеваний могут быть причиной лихорадки неясного генеза (ЛНГ) [1]. Среди основных выделяют инфекционные заболевания, неинфекционные воспалительные состояния (системная красная волчанка, системные васкулиты и др.), злокачественные новообразования и пр. [2, 3]. Кроме того, до 50% случаев ЛНГ остаются недиагностированными [4, 5]. В связи с полиморфизмом причин, вызывающих ЛНГ, диагностический поиск представляет большую сложность для врачей-клиницистов. Длительный процесс диагностического поиска увеличивает время пребывания пациентов в стационаре, повышая тем самым риск развития внутрибольничных инфекций и затраты на медицинское обследование [6].

В рамках дифференциально-диагностического поиска при ЛНГ из визуализирующих методов применяются позитронно-эмиссионная томография, совмещённая с компьютерной томографией (ПЭТ/КТ), компьютерная томография (КТ) и ультразвуковое исследование (УЗИ), при этом выбор методики зависит от симптоматики и потенциальной вовлечённости органов и систем [7]. По данным ретроспективного исследования [4], ПЭТ/КТ оказалась решающим методом в постановке окончательного диагноза у 54% пациентов с ЛНГ. При этом ревматические и инфекционные заболевания, протекающие с лихорадкой как единственным симптомом, могут быть диагностированы и без использования этого дорогостоящего и малодоступного метода, на основании иных методов медицинской визуализации.

В данной статье мы представляем клинический случай гигантоклеточного артериита неклассического течения — без поражения височной артерии. Окончательный диагноз пациентке с направительным диагнозом язвенного колита и длительно существующей фебрильной лихорадкой был установлен на основании результатов компьютерной томографии с внутривенным контрастированием. Данное описание случая было подготовлено в соответствии с рекомендациями CARE (CAse Report — описание случаев) [8].

ОПИСАНИЕ КЛИНИЧЕСКОГО СЛУЧАЯ

О пациенте

Пациентка Б., 61 год, в ноябре 2020 года поступила в отделение гастроэнтерологии Университетской клинической больницы № 1 Клинического центра Первого Московского государственного медицинского университета имени И.М. Сеченова (далее УКБ № 1 КЦ Сеченовского Университета) с жалобами на общую слабость, повышение температуры тела в вечерние часы до 39,5°C, боли в прекардиальной и межлопаточной областях, выраженную ночную потливость, снижение веса на 10 кг за последние 3 месяца.

Из анамнеза заболевания. В августе 2020 года на фоне относительного здоровья пациентка впервые отметила ежедневное повышение температуры тела до 38,5–39°C, сопровождающееся болями в мышцах и суставах. Приём жаропонижающих препаратов не принёс выраженного эффекта, в связи с чем Б. была госпитализирована в инфекционный стационар, где ей проводилась антибиотикотерапия, пероральная и инфузионная дезинтоксикационная терапия. На фоне проводимого лечения отмечалось улучшение общего состояния, однако сохранялось субфебрильное повышение температуры тела в вечернее время. При обследовании по данным КТ органов грудной клетки выявлены малый выпот в плевральных полостях, полосовидные участки перибронховаскулярного уплотнения в обоих лёгких, субсегментарные малые компрессионные ателектазы в базальных отделах обоих лёгких, высокое положение куполов диафрагмы (рис. 1), при этом признаков вирусной пневмонии не обнаружено.

При эзофагогастродуоденоскопии верхние отделы желудочно-кишечного тракта не проявили признаков патологии. По данным колоноскопии выявлено эрозивное поражение слизистой нисходящей, сигмовидной и прямой кишки с умеренно выраженным отёком. По результатам гистологического исследования биоптатов толстой кишки описаны признаки катарального колита. Тогда же в инфекционном стационаре выполнена КТ органов брюшной полости с внутривенным контрастированием (рис. 2), на которой выявлены множественные лимфоузлы брюшной полости (парааортальные и верхнебрыжечные лимфоузлы с максимальным размером до 10 мм по короткой оси).

В связи с выявленными изменениями, трактованными как лимфаденопатия, в сентябре 2020 года пациентка обратилась к гематологу. Проведена трепанобиопсия с гистологическим исследованием костного мозга, при котором данных в пользу заболеваний системы крови не обнаружено. Повторно выполнена КТ органов грудной клетки (рис. 3): по сравнению с представленным исследованием от августа 2020 года (см. рис. 1) отмечались резорбция жидкости из плевральных полостей, уменьшение распространённости гиповентиляционных изменений в базальных отделах лёгких. В остальном без существенной динамики.

В ноябре 2020 года пациентка повторно госпитализирована в стационар в связи с вечерними подъёмами температуры тела до 39°C, сопровождающимися выраженной ночной потливостью. Опираясь на данные колоноскопии от августа 2020 года, причиной лихорадки рассматривали язвенный колит. Пациентка была выписана из стационара в связи с положительным результатом полимеразной цепной реакции на COVID-19 и рекомендациями продолжить дообследование по достижении реконвалесценции. Пациентке назначена также терапия язвенного колита препаратами месалазина в суточной дозе 4 г, в течение

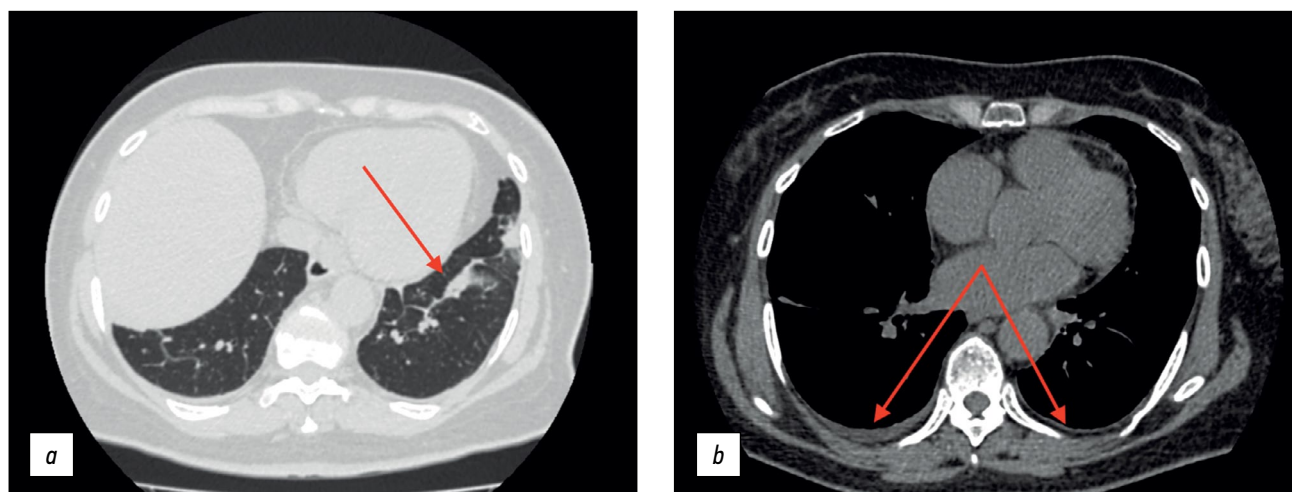


Рис. 1. Компьютерная томография органов грудной клетки (август 2020 года), аксиальная плоскость: красными стрелками указаны субсегментарный компрессионный ателектаз (а) и малый выпот в плевральных полостях (b).

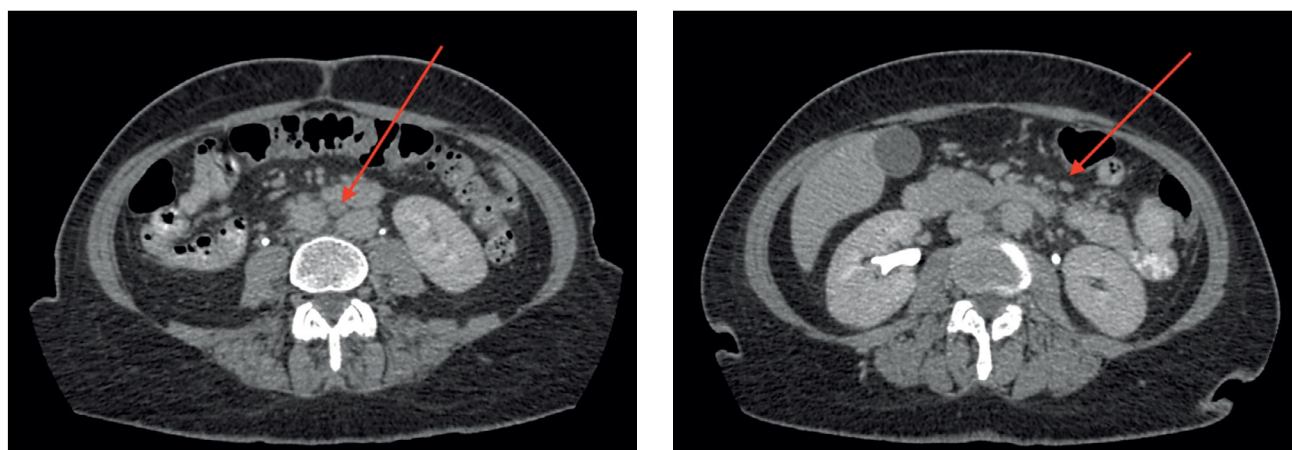


Рис. 2. Компьютерная томография органов брюшной полости с внутривенным контрастированием (сентябрь 2020 года), аксиальная плоскость: красными стрелками указаны внутрибрюшные лимфоузлы.

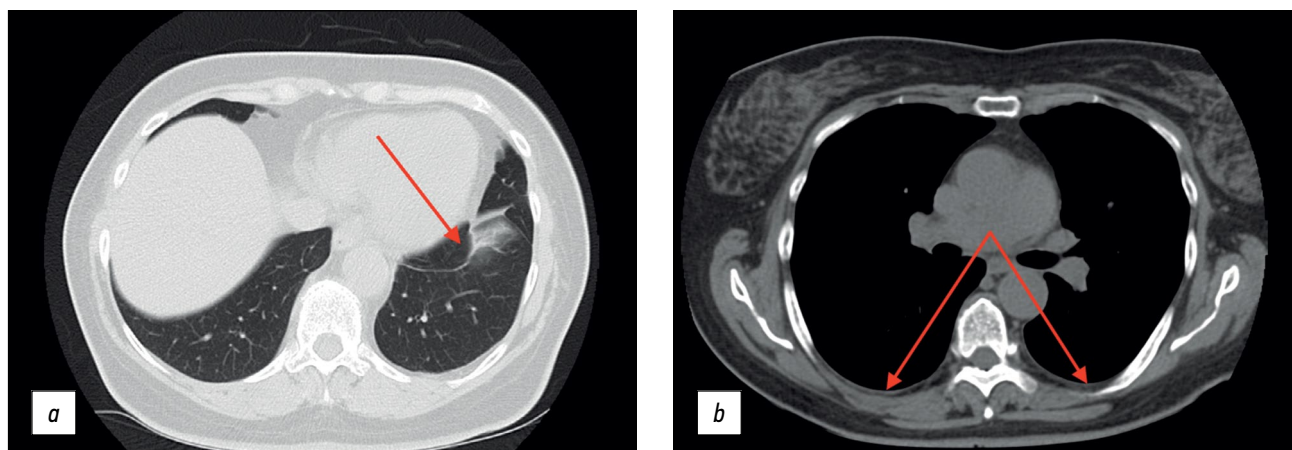


Рис. 3. Компьютерная томография органов грудной клетки (сентябрь 2020 года), аксиальная плоскость: красные стрелки указывают (а) на участок с уменьшением распространённости гиповентиляционных изменений (см. рис. 1, а); (b) на отсутствие жидкости в плевральных полостях (см. рис. 1, b).

нескольких дней отмечался положительный эффект. Однако после возобновления лихорадки пациентка самостоятельно отменила приём препарата.

После получения двух отрицательных мазков на COVID-19 в ноябре 2020 года Б. обратилась к колопроктологу: при обследовании на амбулаторном этапе

Таблица 1. Воспалительные маркеры во время госпитализации до начала лечения

Показатель	Норма	24.11.2020	01.12.2020
Скорость оседания эритроцитов, мм/ч	1–20	71	55
Фибриноген, г/л	1,8–4	10,16	10,97
С-реактивный белок, мг/л	0–5	119	130

выявлено повышение уровня фекального кальпротектина до 321 мкг/г (норма до 50 мкг/г), в связи с чем пациентка госпитализирована в гастроэнтерологическое отделение УКБ № 1 КЦ Сеченовского Университета для обследования и принятия решения о дальнейшей тактике.

Результаты физикальной, лабораторной и инструментальной диагностики

При первичном осмотре в отделении отмечались повышение температуры тела до 37,5°C, бледность кожных покровов и видимых слизистых, хрипы над заднебазальными отделами левого лёгкого, тахикардия до 98 ударов в минуту, умеренная болезненность живота при пальпации

в околопупочной области. При оценке периферических артерий пульсация сохранена, достаточна. В остальном без особенностей.

В лабораторных анализах отмечалось выраженное повышение неспецифических маркеров воспаления (табл. 1).

По данным УЗИ органов брюшной полости лимфаденопатии, признаков воспаления в гепатопанкреатобилиарной зоне не выявлено. Пациентке повторно выполнена фиброколоноскопия: слизистые толстой кишки и дистальных отделов тонкой кишки без изменений. По результатам гистологического исследования биоптатов слизистой оболочки толстой кишки структурных и воспалительных изменений не выявлено.

В связи с отсутствием данных, свидетельствующих в пользу язвенного колита, пациентке с лихорадкой неясного генеза и высоким уровнем неспецифических воспалительных маркеров выполнен анализ на ENA-профиль (антитела к экстрагируемым ядерным антигенам): Jo-1, RNP/Sm, Scl-70, Sm, SS-A (Ro), SS-B (La), pANCA, cANCA не выявлены.

Повторно выполнена КТ органов грудной клетки и брюшной полости с внутривенным контрастированием (рис. 4), по данным которой выявлены плевроапикальные

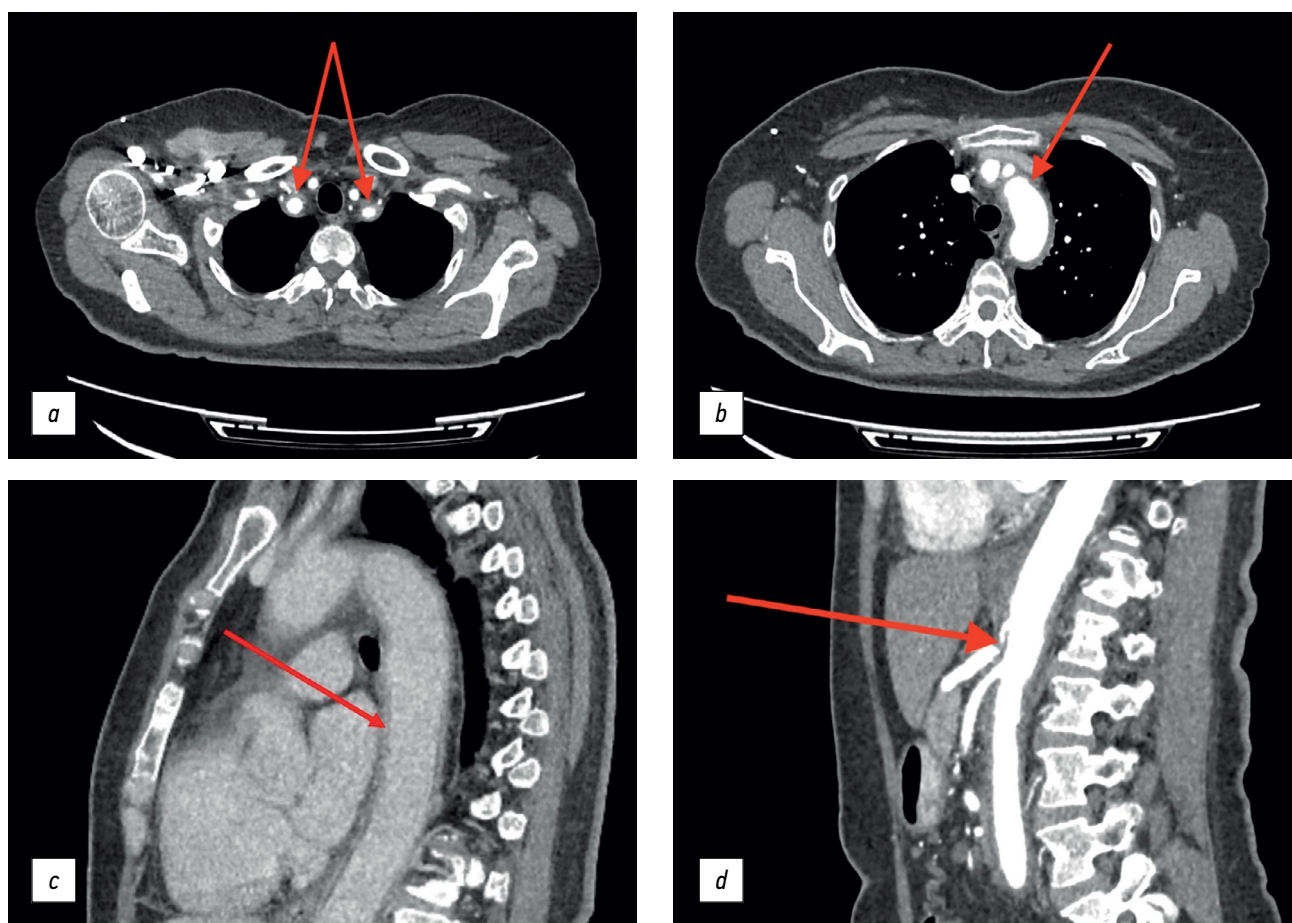


Рис. 4. Компьютерная томография органов грудной клетки и брюшной полости с внутривенным контрастированием (ноябрь 2020 года): красными стрелками отмечено изменение стенок брахиоцефального ствола и подключичных артерий (а, аксиальная плоскость); утолщение стенки аорты (b, аксиальная плоскость); слоистость стенок аорты с активным накоплением контрастного препарата (с, сагиттальная плоскость); окклюзия устья чревного ствола (d, сагиттальная плоскость).

наложения в области верхушек лёгких; обращали на себя внимание утолщение стенок аорты до 5 мм, слоистость и нечёткость контуров её стенки, при контрастировании стенки сосуда активно накапливали контрастный препарат. Аналогичные изменения отмечались в стенках брахиоцефального ствола, подключичных артерий, чревном стволе. Описана также фибромускулярная дисплазия почечных артерий. Представленная КТ-картина соответствовала проявлениям артериита с признаками активности.

Диагноз

В связи с выявленными изменениями проводилась дифференциальная диагностика между гигантоклеточным и специфическим артериитом. Артериит Такаясу не включался в дифференциально-диагностический ряд ввиду возраста пациентки и нетипичного поражения аорты. Серологический анализ на сифилис отрицательный, пациентка также проконсультирована фтизиатром, выполнена иммунодиагностика туберкулёзной инфекции, T-SPOT.TB: ответная реакция соответствует функциональной несостоятельности лимфоцитов. После получения результата тестов пациентка проконсультирована ревматологом, установлен диагноз: «Гигантоклеточный артериит с поражением аорты, брахиоцефального ствола, подключичных артерий, чревного ствола». Начата противовоспалительная терапия (преднизолон в дозе 60 мг/сут) под прикрытием противотуберкулёзных препаратов (изониазид по 0,3 г/сут + пиридоксина гидрохлорид по 0,03 г/сут).

Динамика и исходы

Для оценки степени протяжённости поражения артерий пациентке даны рекомендации о выполнении ПЭТ/КТ с 18F-ФДГ (фтордезоксиглюкоза), однако Б. воздержалась от выполнения исследования, принимая во внимание выраженное клиническое улучшение в результате терапии глюкокортикоидами.

На фоне лечения отмечена положительная динамика: лихорадка купирована, боли в груди и ночная потливость не рецидивировали, лабораторные показатели с тенденцией к нормализации (снижение скорости оседания эритроцитов до 42 мм/ч, С-реактивного белка до 16 мг/л, фибриногена до 6,76 г/л); субъективно отмечает улучшение самочувствия, восстановление аппетита. На момент выписки сохранялись жалобы на слабость, сердцебиение при физических и эмоциональных нагрузках.

Через 3 месяца пациентка осмотрена повторно: самочувствие удовлетворительное, жалоб нет, продолжает терапию метилпреднизолоном (суточная доза 4 мг).

ОБСУЖДЕНИЕ

Описанный нами клинический случай подчёркивает трудности в обследовании пациентов с васкулитом крупных сосудов, у которых на первый план в клинической

картине выходит ЛНГ. У нашей пациентки присутствовали неспецифические симптомы, такие как высокая температура и потеря массы тела, астеновегетативный и болевой синдромы, но отсутствовали классические черепные симптомы, которые могли бы указать на наличие височного артериита. Кроме того, симптомы или клинические проявления сосудистой недостаточности, подозрительные в отношении васкулита крупных сосудов, также отсутствовали, что ещё больше отсрочило постановку диагноза. Более того, у пациентки ранее были выявлены изменения при колоноскопии и биопсии, которые свидетельствовали в пользу язвенного колита, рассматриваемого в качестве возможной причины ЛНГ, что и послужило причиной её обращения к колопроктологу и последующей госпитализации в отделение гастроэнтерологии. Однако полное отсутствие у пациентки какой-либо симптоматики со стороны желудочно-кишечного тракта изначально поставило под сомнение диагноз язвенного колита. В связи с этим больной была выполнена повторная колоноскопия с биопсией, где данных за воспалительный процесс в кишечнике не было получено.

В литературе описано менее 10 случаев дебюта язвенного колита с изолированной ЛНГ при отсутствии значимой кишечной симптоматики. В одном из них у 71-летней пациентки язвенный колит проявлялся ЛНГ без сопутствующих желудочно-кишечных симптомов. Окончательный диагноз был установлен на основании данных ПЭТ/КТ, при которой определялось усиленное поглощение 18F-ФДГ стенками толстой кишки, что свидетельствовало об активном воспалении [9]. М. Soliman и соавт. [10] описали другой случай воспалительного заболевания кишечника, а именно болезни Крона, у 29-летнего пациента с длительной персистирующей фебрильной лихорадкой и незначительной кишечной симптоматикой. При КТ органов брюшной полости обращало на себя внимание утолщение стенки слепой кишки, в дальнейшем диагноз был подтверждён при колоноскопии с биопсией.

В описанном нами случае анамнестические данные о поражении слизистой оболочки толстой кишки были расценены как проявления реактивного колита в рамках системной воспалительной реакции, первичным очагом которого не являлся патологический процесс в кишечнике. В пользу этого свидетельствовало купирование воспаления на фоне непродолжительной терапии препаратами 5-аминосалициловой кислоты. При этом в некоторых случаях у пациентов с установленным диагнозом гигантоклеточного артериита в дальнейшем выявляется сопутствующий диагноз воспалительного заболевания кишечника. В проспективном исследовании Ya. Yavne и соавт. [11] выявили, что среди пациентов с установленным диагнозом гигантоклеточного артериита часто встречается сопутствующий диагноз воспалительного заболевания кишечника — болезни Крона или язвенного колита (отношение шансов 2,63; $p < 0,001$). Учитывая это, пациенты с гигантоклеточным артериитом нуждаются

в пристальном внимании клиницистов с точки зрения потенциального развития воспалительного заболевания кишечника.

Нет исследований, в которых бы изучалась ценность КТ в диагностике ЛНГ в сравнении с ПЭТ/КТ. КТ обладает своими преимуществами: меньшая продолжительность исследования, высокая доступность, меньшая стоимость и лучевая нагрузка. В описанном нами случае именно КТ с внутривенным контрастированием стала решающим методом в постановке окончательного диагноза. Схожий случай был описан V.S. Schäfer и соавт. [12]: пациентке 79 лет с клиникой ЛНГ, дефицитом массы тела и повышением маркеров воспаления была проведена КТ органов грудной и брюшной полостей с внутривенным контрастированием, при которой определялись утолщённые стенки аорты и её крупных ветвей, височная артерия также была интактна. Больной был установлен диагноз гигантоклеточного артериита. В последующем выполнена ПЭТ/КТ для исключения онкологического процесса и начата терапия глюкокортикоидами с положительным эффектом. D. AlNuaimi и соавт. [13] также описали пациента 63 лет с рецидивирующей лихорадкой, быстрой потерей веса, повышением маркеров воспаления, у которого внезапно возникли повторяющиеся эпизоды потери зрения. В стационаре, куда он самостоятельно обратился за помощью, была выполнена магнитно-резонансная томография головного мозга, при которой визуализировалась картина ишемического инсульта правой затылочной области. Позднее для выявления причин ЛНГ была выполнена КТ органов грудной и брюшной полости с внутривенным контрастированием: обнаружено диффузное утолщение и контрастное усиление стенок аорты и её основных ветвей. Был заподозрен гигантоклеточный артериит, в связи с чем проведено УЗИ с дальнейшей биопсией височных артерий. По результатам исследования подтверждено поражение височных артерий в рамках гигантоклеточного артериита. Для оценки протяжённости поражения выполнялась ПЭТ/КТ с 18F-ФДГ, после чего начата терапия глюкокортикоидами с положительным эффектом [13]. С другой стороны, КТ не всегда позволяет полностью или частично заменить ПЭТ/КТ в диагностике гигантоклеточного артериита. Так, L. Grazioli-Gauthier и соавт. [14] описали случай гигантоклеточного артериита с нетипичным течением и ЛНГ как доминирующим симптомом в клинической картине. У пациента 73 лет с фебрильной лихорадкой, повышением острофазовых показателей выполненная КТ грудной клетки и брюшной полости в отношении поиска причин ЛНГ оказалась неинформативной, в связи с чем была проведена ПЭТ/КТ. По результатам ПЭТ/КТ определялся минимальный воспалительный процесс в восходящей аорте, кроме того, наблюдалась интенсивная метаболическая активность в восходящей ободочной кишке (при колоноскопии в дальнейшем патология кишечника исключена). Окончательный диагноз был установлен по данным биопсии височной артерии [14].

В отличие от указанных случаев, где окончательный диагноз был установлен по данным ПЭТ/КТ и/или биопсии височной артерии, в описанном нами случае решающим методом исследования для диагностики гигантоклеточного артериита была КТ с внутривенным контрастированием. Это стало возможным за счёт выраженной активности и распространённости воспалительного процесса, а также нетипичного течения без поражения височной артерии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный клинический случай позволяет вынести ряд ключевых заключений. В частности, гигантоклеточный артериит может являться причиной лихорадки неясного генеза, при этом его течение может проходить нетипично, без поражения височной артерии, что затрудняет диагностику. КТ с внутривенным контрастированием может сыграть значительную роль в диагностике артериита, в том числе гигантоклеточного без поражения височной артерии. Использование КТ с внутривенным контрастированием в некоторых случаях может быть альтернативой ПЭТ/КТ в рамках диагностического поиска при лихорадке неясного генеза.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Источник финансирования. Данная статья подготовлена авторским коллективом в рамках НИР «Опportunистический скрининг социально значимых и иных распространённых заболеваний» (№ ЕГИСУ: № 123031400009-1) в соответствии с приказом Департамента здравоохранения города Москвы от 21.12.2022 № 1196 «Об утверждении государственных заданий, финансовое обеспечение которых осуществляется за счет средств бюджета города Москвы, государственным бюджетным (автономным) учреждениям, подведомственным Департаменту здравоохранения города Москвы, на 2023 год и плановый период 2024 и 2025 годов».

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Вклад авторов. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распределён следующим образом: Ю.Ф. Шумская — концепция, сбор и обработка материала, анализ полученных данных, написание текста рукописи; Н.В. Костинова — сбор и обработка материала, написание текста рукописи; Д.А. Ахмедзянова — концепция, редактирование текста рукописи; М.М. Сулейманова — редактирование текста рукописи, подготовка иллюстративного материала; Е.В. Фоминых — редактирование текста рукописи, подготовка иллюстративного материала; М.Г. Мнацаканян — окончательное редактирование, одобрение рукописи; Р.В. Решетников — написание текста рукописи, окончательное редактирование.

Информированное согласие на публикацию. Пациентка добровольно подписала информированное согласие на публикацию персональной медицинской информации и фотографий в обезличенной форме в журнале Digital Diagnostics.

Благодарности. Авторы выражают благодарность Блохину Ивану Андреевичу за помощь в работе с текстом.

ADDITIONAL INFORMATION

Funding source. This article was prepared by a group of authors as a part of the research and development effort titled "Opportunistic screening of high-profile and other common diseases", No. 123031400009-1 (USIS No. 123031400009-1) in accordance with the Order No. 1196 dated December 21, 2022 "On approval of state assignments funded by means of allocations from the budget of the city of Moscow to the state budgetary (autonomous) institutions subordinate to the Moscow Health Care Department, for 2023 and the planned period of 2024 and 2025" issued by the Moscow Health Care Department.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work. Y.F. Shumskaya — concept, collection and processing of material, analysis of data, writing of the manuscript; N.V. Kostikova — collection and processing of material, writing of the manuscript; D.A. Akhmedzyanova — concept, manuscript editing; M.M. Suleymanova — manuscript editing, preparation of illustrative material; E.V. Fominykh — manuscript editing, preparation of illustrative material; M.G. Mnatsakanyan — final editing of the manuscript. Suleymanova — manuscript editing, preparation of illustrative material; M.G. Mnatsakanyan — final editing, manuscript approval, R.V. Reshetnikov — manuscript writing, final editing.

Consent for publication. Written consent was obtained from the patient for publication of relevant medical information and all of accompanying images within the manuscript in Digital Diagnostics Journal.

Acknowledgments. The authors would like to thank Ivan Andreevich Blokhin for his help with drafting this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Unger M., Karanikas G., Kerschbaumer A., et al. Fever of unknown origin (Fuo) revised // *Wien Klin Wochenschr.* 2016. Vol. 128, N 21-22. P. 796–801. doi: 10.1007/s00508-016-1083-9
2. David A., Quinlan J.D. Fever of unknown origin in adults // *Am Fam Physician.* 2022. Vol. 105, N 2. P. 137–143.
3. Fusco F.M., Pisapia R., Nardiello S., et al. Fever of unknown origin (FUO): Which are the factors influencing the final diagnosis? A 2005–2015 systematic review // *BMC Infect Dis.* 2019. Vol. 19, N 1. P. 653. doi: 10.1186/s12879-019-4285-8
4. Weitzer F., Hooshmand T., Pernthaler B., et al. Diagnostic value of F-18 FDG PET/CT in fever or inflammation of unknown origin in a large single-center retrospective study // *Sci Rep.* 2022. Vol. 12, N 1. P. 1883. doi: 10.1038/s41598-022-05911-7
5. Wright W.F., Auwaerter P.G. Fever and fever of unknown origin: Review, recent advances, and lingering dogma // *Open Forum Infect Dis.* 2020. Vol. 7, N 5. P. 132. doi: 10.1093/ofid/ofaa132
6. Horowitz H.W. Fever of unknown origin or fever of too many origins? // *N Engl J Med.* 2013. Vol. 368, N 3. P. 197–199. doi: 10.1056/NEJMp1212725
7. Cunha B.A., Lortholary O., Cunha C.B. Fever of unknown origin: A clinical approach // *Am J Med.* 2015. Vol. 128, N 10. P. 1138.e1–1138.e15. doi: 10.1016/j.amjmed.2015.06.001
8. Barber M.S., Aronson J.K., von Schoen-Angerer T., et al. Рекомендации CARE для описания случаев: разъяснения

и уточнения // *Digital Diagnostics.* 2022. Т. 3. № 1. С. 16–42. doi: 10.17816/DD105291

9. Shpilberg R., Hadjiyiannis D., Khan S.A. Ulcerative colitis presenting as pyrexia of unknown origin (PUO) without bowel symptoms // *Clin Med (Lond).* 2012. Vol. 12, N 4. P. 389–390. doi: 10.7861/clinmedicine.12-4-389
10. Soliman M., Shirazi-Nejad A., Bullas D., et al. An unusual case of pyrexia of unknown origin // *Cureus.* 2021. Vol. 13, N 7. P. e16684. doi: 10.7759/cureus.16684
11. Yavne Y., Tiosano S., Ben-Ami D., et al. Giant cell arteritis and inflammatory bowel disease: Is there a connection? Results from a population-based study // *Autoimmun Rev.* 2018. Vol. 17, N 11. P. 1134–1137. doi: 10.1016/j.autrev.2018.06.003
12. Schäfer V.S., Warrington K.J., Williamson E.E., et al. Delayed diagnosis of biopsy-negative giant cell arteritis presenting as fever of unknown origin // *J Gen Intern Med.* 2009. Vol. 24, N 4. P. 532–536. doi: 10.1007/s11606-009-0925-9
13. AlNuaimi D., Ansari H., Menon R., et al. Large vessel vasculitis and the rising role of FDG PET-CT: A case report and review of literature // *Radiol Case Rep.* 2020. Vol. 15, N 11. P. 2246–2249. doi: 10.1016/j.radcr.2020.08.066
14. Grazioli-Gauthier L., Marcoli N., Vanini G., et al. Giant cell arteritis among fevers of unknown origin (FUO): An atypical presentation // *Eur J Case Rep Intern Med.* 2021. Vol. 8, N 3. P. 002254. doi: 10.12890/2021_002254

REFERENCES

1. Unger M, Karanikas G, Kerschbaumer A, et al. Fever of unknown origin (Fuo) revised. *Wien Klin Wochenschr.* 2016;128(21-22):796–801. doi: 10.1007/s00508-016-1083-9
2. David A, Quinlan JD. Fever of unknown origin in adults. *Am Fam Physician.* 2022;105(2):137–143.
3. Fusco FM, Pisapia R, Nardiello S, et al. Fever of unknown

origin (FUO): Which are the factors influencing the final diagnosis? A 2005–2015 systematic review. *BMC Infect Dis.* 2019;19(1):653. doi: 10.1186/s12879-019-4285-8

4. Weitzer F, Hooshmand T, Pernthaler B, et al. Diagnostic value of F-18 FDG PET/CT in fever or inflammation of unknown origin in a large single-center retrospective study. *Sci Rep.* 2022;12(1):1883. doi: 10.1038/s41598-022-05911-7

5. Wright WF, Auwaerter PG. Fever and fever of unknown origin: Review, recent advances, and lingering dogma. *Open Forum Infect Dis.* 2020;7(5):132. doi: 10.1093/ofid/ofaa132

6. Horowitz HW. Fever of unknown origin or fever of too many origins? *N Engl J Med.* 2013;368(3):197–199. doi: 10.1056/NEJMp1212725

7. Cunha BA, Lortholary O, Cunha CB. Fever of unknown origin: A clinical approach. *Am J Med.* 2015;128(10):1138.e1–1138.e15. doi: 10.1016/j.amjmed.2015.06.001

8. Barber MS, Aronson JK, von Schoen-Angerer T, et al. CARE guidelines for case reports: explanation and elaboration document. Translation into Russian. *Digital Diagnostics.* 2022;3(1):16–42. (In Russ). doi: 10.17816/DD105291

9. Shpilberg R, Hadjiyiannis D, Khan SA. Ulcerative colitis presenting as pyrexia of unknown origin (PUO) without bowel symptoms. *Clin Med (Lond).* 2012;12(4):389–390. doi: 10.7861/clinmedicine.12-4-389

10. Soliman M, Shirazi-Nejad A, Bullas D, et al. An unusual case of pyrexia of unknown origin. *Cureus.* 2021;13(7):e16684. doi: 10.7759/cureus.16684

11. Yavne Y, Tiosano S, Ben-Ami D, et al. Giant cell arteritis and inflammatory bowel disease: Is there a connection? Results from a population-based study. *Autoimmun Rev.* 2018;17(11):1134–1137. doi: 10.1016/j.autrev.2018.06.003

12. Schäfer VS, Warrington KJ, Williamson EE, Kermani TA. Delayed diagnosis of biopsy-negative giant cell arteritis presenting as fever of unknown origin. *J Gen Intern Med.* 2009;24(4):532–536. doi: 10.1007/s11606-009-0925-9

13. AlNuaimi D, Ansari H, Menon R, et al. Large vessel vasculitis and the rising role of FDG PET-CT: A case report and review of literature. *Radiol Case Rep.* 2020;15(11):2246–2249. doi: 10.1016/j.radcr.2020.08.066

14. Grazioli-Gauthier L, Marcoli N, Vanini G, et al. Giant cell arteritis among fevers of unknown origin (FUO): An atypical presentation. *Eur J Case Rep Intern Med.* 2021;8(3):002254. doi: 10.12890/2021_002254

ОБ АВТОРАХ

* Шумская Юлия Федоровна;

адрес: Россия, 127051, Москва, ул. Петровка, д. 24, стр. 1;
ORCID: 0000-0002-8521-4045;
eLibrary SPIN: 3164-5518;
e-mail: ShumskayaYF@zdrav.mos.ru

Костикова Нина Владимировна;

ORCID: 0000-0003-3509-7271;
eLibrary SPIN: 7962-4554;
e-mail: n.kostikova@yandex.ru

Ахмедзянова Дина Альфредовна;

ORCID: 0000-0001-7705-9754;
eLibrary SPIN: 6983-5991;
e-mail: dina_akhm@mail.ru

Сулейманова Мария Мирославовна;

ORCID: 0000-0002-5776-2693;
eLibrary SPIN: 7193-6122;
e-mail: ashe.danny.jush@gmail.com

Фоминых Екатерина Викторовна, канд. мед. наук;

ORCID: 0000-0003-3733-4381;
e-mail: evfominykh@mail.ru

Мнацаканян Марина Генриковна, д-р мед. наук, профессор;

ORCID: 0000-0001-9337-7453;
eLibrary SPIN: 2015-1822;
e-mail: mnatsakanyan08@mail.ru

Решетников Роман Владимирович, канд. физ.-мат. наук;

ORCID: 0000-0002-9661-0254;
eLibrary SPIN: 8592-0558;
e-mail: reshetnikov@fbb.msu.ru

AUTHORS' INFO

* Yuliya F. Shumskaya;

address: 24/1 Petrovka street, 127051 Moscow, Russia;
ORCID: 0000-0002-8521-4045;
eLibrary SPIN: 3164-5518;
e-mail: ShumskayaYF@zdrav.mos.ru

Nina V. Kostikova;

ORCID: 0000-0003-3509-7271;
eLibrary SPIN: 7962-4554;
e-mail: n.kostikova@yandex.ru

Dina A. Akhmedzyanova;

ORCID: 0000-0001-7705-9754;
eLibrary SPIN: 6983-5991;
e-mail: dina_akhm@mail.ru

Maria M. Suleymanova;

ORCID: 0000-0002-5776-2693;
eLibrary SPIN: 7193-6122;
e-mail: ashe.danny.jush@gmail.com

Ekaterina V. Fominykh, MD, Cand. Sci. (Med.);

ORCID: 0000-0003-3733-4381;
e-mail: evfominykh@mail.ru

Marina G. Mnatsakanyan, MD, Dr. Sci. (Med), Professor;

ORCID: 0000-0001-9337-7453;
eLibrary SPIN: 2015-1822;
e-mail: mnatsakanyan08@mail.ru

Roman V. Reshetnikov, Cand. Sci. (Phys.-Math.);

ORCID: 0000-0002-9661-0254;
eLibrary SPIN: 8592-0558;
e-mail: reshetnikov@fbb.msu.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD430128>

Хронический пищеводный свищ как редкая причина вторичного остеомиелита грудного отдела позвоночника

В.А. Заря, П.В. Гаврилов, М.Е. Макогонова, А.Р. Козак, А.А. Вишневский

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт фтизиопульмонологии, Санкт-Петербург, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Инфекционные заболевания позвоночника представляют собой воспалительные деструктивные заболевания органа и его структурных элементов в результате инфицирования гематогенным, лимфогенным или контактным путём, в том числе могут являться осложнением хирургического вмешательства. При постановке диагноза крайне важно оценивать в совокупности анамнез, клиническую картину, а также данные лабораторных исследований и лучевой диагностики. В работе представлен клинический случай вторично развившегося спондилита позвонков ThVII–ThVIII вследствие пищевого свища. При первичной диагностике спондилит связали со спинальной анестезией, которая проводилась за 6 месяцев до начала заболевания, так как имел место свищевой дефект на коже в поясничной области. По этому поводу трижды проводились оперативные вмешательства в хирургическом стационаре по месту жительства. Данные эндоскопического исследования и жалобы пациентки на связь между приёмами пищи, появлением болей и характером отделяемого из свища не были приняты врачами изначально во внимание. С помощью дополнительного обследования, включающего компьютерную томографию пищевода с пероральным контрастированием и компьютерно-томографическую фистулографию, был установлен основной диагноз «Свищ пищевода», а спондилит грудного отдела позвоночника оказался лишь вторичным осложнением.

Таким образом, окончательный диагноз при болях в спине, обусловленных не только инфицированием, но и являющихся осложнением хирургического вмешательства, должен формулироваться после проведения дифференциальной диагностики с альтернативными заболеваниями позвоночника.

Ключевые слова: остеомиелит; спондилит; свищ пищевода.

Как цитировать:

Заря В.А., Гаврилов П.В., Макогонова М.Е., Козак А.Р., Вишневский А.А. Хронический пищеводный свищ как редкая причина вторичного остеомиелита грудного отдела позвоночника // *Digital Diagnostics*. 2023. Т. 4, № 3. С. 403–410. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD430128>

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD430128>

Chronic esophageal fistula as a rare cause of secondary osteomyelitis of the thoracic spine

Valeriya A. Zarya, Pavel V. Gavrilov, Marina E. Makogonova,
Andrey R. Kozak, Arkadiy A. Vishnevskiy

Saint-Petersburg State Research Institute of Phthisiopulmonology, Saint Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Infectious diseases affecting the spine are inflammatory destructive diseases that involved the organ and its structural elements as a result of infection by hematogenic, lymphogenic, or contact pathways, including may be a complication of surgical intervention. In arriving at an accurate diagnosis, it is extremely important to evaluate the anamnesis, the clinical picture, as well as the data of laboratory studies and radiation diagnostics in the aggregate.

This article presents a clinical case with the development of secondary ThVII–ThVIII vertebral spondylitis due to esophageal fistula. At the initial diagnosis, spondylitis was associated with spinal anesthesia performed six months prior to onset of the disease, as there was a fistulous defect on the skin in the lumbar region. Consequently, surgical interventions were performed three times in a surgical hospital at the place of residence. The data from the endoscopic examination, as well as the patient's complaints regarding the relationship between meals, the appearance of pain, and the nature of the discharge from the fistula were not taken into account by doctors initially. With the help of an additional examination, including computed tomography of the esophagus with oral contrast and computed tomography fistulography, the main diagnosis was esophageal fistula. Thoracic spondylitis was only a secondary complication.

Thus, the final diagnosis of back pain and fistula in the lumbar region should be formulated after differential diagnosis with alternative diseases of the spine.

Keywords: osteomyelitis; spondylitis; esophageal fistula.

To cite this article:

Zarya VA, Gavrilov PV, Makogonova ME, Kozak AR, Vishnevskiy AA. Chronic esophageal fistula as a rare cause of secondary osteomyelitis of the thoracic spine. *Digital Diagnostics*. 2023;4(3):403–410. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD430128>

Received: 16.05.2023

Accepted: 22.08.2023

Published: 30.08.2023

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD430128>

慢性食管瘘作为继发性胸椎骨髓炎的罕见病因

Valeriya A. Zarya, Pavel V. Gavrillov, Marina E. Makogonova,
Andrey R. Kozak, Arkadiy A. Vishnevskiy

Saint-Petersburg State Research Institute of Phthisiopulmonology, Saint Petersburg, Russian Federation

简评

脊柱感染性疾病是由于血源性、淋巴原性或接触性感染（包括手术并发症）引起的器官及其结构元素的炎症性破坏性疾病。在进行诊断时，对病史、临床表现以及实验室检查和放射诊断数据进行评估极为重要。

本文介绍一例因食管瘘引起的ThVII-ThVIII椎骨继发性脊椎炎的临床病例。在最初诊断时，医生认为脊椎炎与脊髓麻醉有关，而脊髓麻醉是在发病前6个月进行的，因为腰部皮肤上有瘘管缺损。这次在居住地的外科医院进行了三次手术治疗。医生最初并没有考虑到内窥镜检查结果以及病人关于进食、疼痛和瘘管分泌物性质之间关系的主诉。在额外检查的帮助下，包括口服造影剂的食道CT扫描和瘘管CT造影，确定了食管瘘的主要诊断，而胸椎脊椎炎只是次要并发症。

因此，在存在背痛的原因不仅是感染，还可能是手术治疗的并发症的情况下，最终诊断应该是在与其他脊柱疾病进行鉴别诊断后再做出的。

关键词：骨髓炎；脊椎炎；食管瘘。

引用本文：

Zarya VA, Gavrillov PV, Makogonova ME, Kozak AR, Vishnevskiy AA. 慢性食管瘘作为继发性胸椎骨髓炎的罕见病因. *Digital Diagnostics*. 2023;4(3):403-410. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD430128>

收到: 16.05.2023

接受: 22.08.2023

发布日期: 30.08.2023

АКТУАЛЬНОСТЬ

Инфекционные заболевания позвоночника — воспалительные деструктивные заболевания позвоночника и его структурных элементов (тел позвонков, межпозвонковых дисков, связочного аппарата, межпозвонковых суставов), вызванные любым бактериальным агентом в результате инфицирования гематогенным, лимфогенным или контактным путём либо являющиеся осложнением хирургического вмешательства (послеоперационные, ятрогенные) [1].

Выделяют инфекционные и неинфекционные (асептические) спондилиты. Причиной инфекционного спондилита является бактериальная, микотическая или паразитарная инвазия. Инфекционный процесс при спондилите может быть связан с гематогенным (септическим) или контактным распространением [2–4], а также быть постманипуляционным (ятрогенным) осложнением [5–8]. Отдельные авторы демонстрируют спондилиты при перфорации пищевода, когда инфекционный процесс может распространяться кзади, поражая шейные или грудные позвонки вторично. Так, в работе I. Janssen и соавт. [9] представлены случаи развития спондилита шейного и грудного отделов позвоночника вследствие перфорации пищевода у пациентов с раком пищевода в анамнезе, получивших комплексное лечение. У некоторых из них это был рецидив пищевода свища (ранее проводилось консервативное и хирургическое лечение). Описан также пример пациентки, проглотившей и самостоятельно извлекавшей зубочистку за 2 месяца до появления спондилита, сопровождавшегося эпидуральным и паравerteбральным абсцессом. В публикации H. Fonga-Djimi и соавт. [10] приведён клинический случай с перфорацией пищевода вследствие попадания инородного тела (колесо от игрушечного автомобиля), осложнённой медиастинитом и спондилитом. G.M. Wadie и соавт. [11] описывают клиническое наблюдение ребёнка, где причиной спондилита шейного отдела позвоночника и флегмоны паравerteбральных мягких тканей послужила проглоченная булавка, которая перфорировала заднюю стенку глотки на уровне входа в гортань. В работе A. van Ooij и соавт. [12] описан спондилит шейного отдела позвоночника, вызванный рыбьей костью, застрявшей в пищеводе пациентки.

Проникновение инфекции в грудную клетку приводит к эмпиеме, перикардиту, медиастиниту. Эмпиема и перикардит могут возникать вторично на фоне спондилита. Инфекция передних отделов грудного и поясничного отделов позвоночника является потенциальной причиной развития поддиафрагмального абсцесса, перитонита, псоас-абсцесса.

В случае с инфекционными спондилитами с целью корректного построения тактики лечения необходимо правильно определить этиологию и возбудителя. Методы лучевой диагностики играют важную роль в установлении диагноза спондилита. Однако лучевая картина

не позволяет достоверно отвечать на вопрос о характере и этиологии инфекционного поражения. Именно поэтому крайне важно при постановке диагноза оценивать в совокупности анамнез, клиническую картину, лабораторные показатели и данные лучевой диагностики.

Представляем описание редкого случая вторичного поражения грудного отдела позвоночника на фоне хронического свищевого процесса в пищеводе.

ОПИСАНИЕ КЛИНИЧЕСКОГО СЛУЧАЯ

О пациенте

Пациентка, 42 года. Три года назад стали беспокоить боли в спине и свищ в поясничной области. По данным анамнеза, за полгода до этого была проведена спинальная анестезия по поводу кесарева сечения. Обострения заболевания с открытием свища случались около 3–4 раз в год. При первичном обследовании выполнена магнитно-резонансная томография (МРТ), по результатам которой выявлен костно-фиброзный блок ThVII–ThVIII (рис. 1), который может свидетельствовать как о затихшем спондилите, так и контрактном поражении позвоночника.

Пациентка трижды подвергалась хирургическим вмешательствам (фистуло- и абсцессотомии) в других стационарах: в операционном материале выявлен гемолитический стрептококк, чувствительный к амоксиклаву, ампициллину, цефотаксиму, ванкомицину, доксициклину, меропенему. Проводилась таргетная антибиотикотерапия, однако данное лечение не дало положительного эффекта. Перед госпитализацией в ФГБУ «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт фтизиопульмонологии» Минздрава России выполнена компьютерная томография (КТ), по данным которой имелись признаки ранее перенесённого спондилита ThVII–ThVIII и правосторонний псоас-абсцесс (рис. 2).

При дополнительном сборе анамнеза пациентка указала на взаимосвязь между приёмом пищи (особенно жидкой), появлением болей и характером патологического содержимого, отделяемого из свищевого хода в поясничной области. По результатам КТ пищевода с пероральным контрастированием, выполненной в связи с указанными жалобами, визуализированы свищевой ход на уровне ThVII из пищевода в правое паравerteбральное пространство до уровня ThX и осумкованная эмпиема плевры справа. Для уточнения протяжённости свищевого хода обследование было дополнено КТ-фистулографией, при которой в свищевой дефект, расположенный в поясничной области справа на уровне позвонка LIII, введён раствор контрастного препарата (Йопромид-370): визуализирован свищевой ход от правой большой поясничной мышцы до уровня позвонка ThVII, на этом же уровне он сообщался с просветом пищевода, куда затекал контрастный препарат (рис. 3).

На контрольной МРТ грудного и поясничного отделов позвоночника, выполненных в стационаре, определялись



Рис. 1. Магнитно-резонансная томография грудного отдела позвоночника: режим STIR, сагиттальная плоскость (а); режим T1-ВИ, сагиттальная плоскость (b); режим T1-ВИ, корональная плоскость (c). Стрелками показан костно-фиброзный блок ThVII–ThVIII.

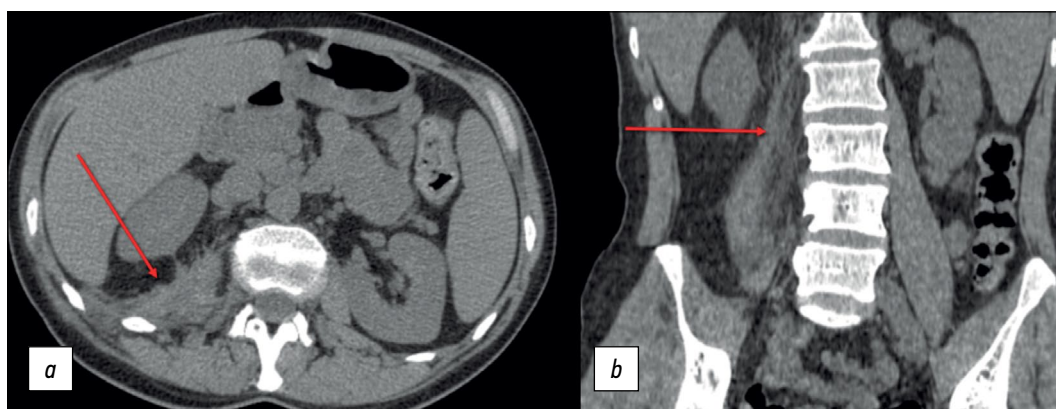


Рис. 2. Компьютерная томография поясничного отдела позвоночника: мягкотканый режим, аксиальная плоскость (а); мягкотканый режим, корональная плоскость (b). Стрелки указывают на абсцесс правой поясничной мышцы.

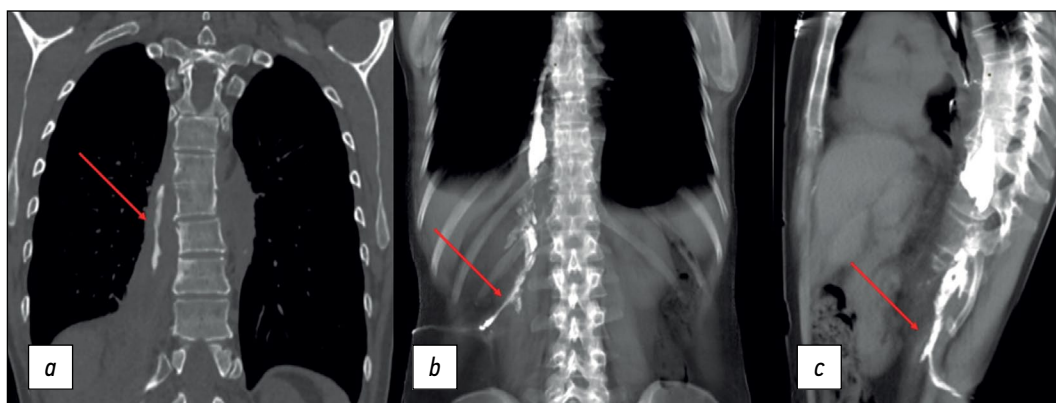


Рис. 3. Компьютерная томография пищевода с пероральным контрастированием, корональная плоскость (а); компьютерно-томографическая фистулография, мультипланарная реконструкция (MPR), корональная и сагиттальная плоскости (b, c). Стрелки указывают на свищевой ход из пищевода в правое паравертебральное пространство от уровня ThVII до ThX.

стабильные изменения тел позвонков ThVII–ThVIII и паравертебральные абсцессы с двух сторон (рис. 4).

Все лабораторные показатели, за исключением скорости оседания эритроцитов (30 мм/ч), были в пределах нормы. Для уточнения дальнейшей тактики ведения

пациента была проведена эзофагогастродуоденоскопия, в результате которой выявлен свищевой ход по задне-левой стенке до 0,5 см, выстланный пищеводным эпителием и прикрытый грануляцией: подтверждён диагноз «Свищ средней трети пищевода». При ретроспективном

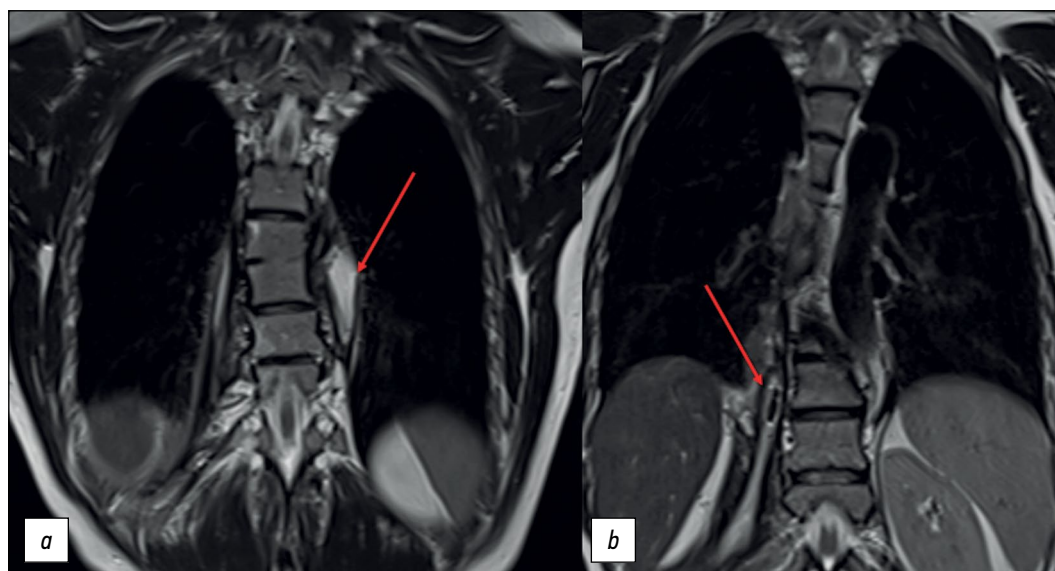


Рис. 4. Магнитно-резонансная томография грудного и поясничного отделов позвоночника, T2-ВИ, корональная плоскость. Костно-фиброзный блок ThVII–ThVIII и паравертебральные абсцессы (стрелки) слева (а), справа с пузырьками воздуха (b).

анализе предыдущих результатов эзофагогастродуоденоскопии обнаружен описанный дефект пищевода, который трактовался как дивертикул, однако в других стационарах данная информация не принималась во внимание.

Таким образом, по совокупности клинических данных и результатов лучевого обследования мультидисциплинарной командой установлен окончательный диагноз: «Пищеводно-плевральный свищ нижней трети пищевода, хроническая осумкованная эмпиема правой плевральной полости. Хронический контактный остеомиелит ThVII–ThVIII со свищом». Пациентка переведена в отделение торакальной хирургии для резекции свища пищевода.

ОБСУЖДЕНИЕ

Источником инфицирования при спондилите может быть любой инфекционный процесс — кариозные зубы, ЛОР-инфекция, флегмоны, эндокардиты и т.д.; поражение структур позвоночника происходит гематогенным или контактным путём, в том числе при проникающих травмах, включая ятрогенные. Учитывая все имеющиеся данные, появляются вопросы, почему проводимое лечение было неэффективным, и какой процесс развился первично — спондилит или свищ пищевода?

Главным аргументом в пользу развития инфекционного спондилита как первичного процесса является наличие эпидуральной анестезии в анамнезе. Однако при подобных оперативных вмешательствах эпидуральную анестезию проводят на уровне позвонков LIII–V, а поражённые позвонки локализируются значительно выше. Ещё одним доводом в пользу первичности спондилита могло послужить наличие паравертебрального абсцесса слева (контралатерально пищеводному свищу). В то же время оставалась непонятной выраженность воспалительных изменений в паравертебральных тканях. Такая картина

обычно не характерна для спондилитов. Как правило, позвонки поражаются интенсивнее, чем окружающие мягкие ткани. Кроме того, пациентка отрицала сам факт травмы пищевода, которая могла бы способствовать появлению свища.

К дополнительным фактам, свидетельствующим в пользу первичности пищеводной этиологии процесса, можно отнести свищевое сообщение паравертебрального абсцесса с пищеводом (диаметр свищевого хода до 5 мм). При эндоскопических исследованиях описывались дивертикул пищевода, интактная стенка пищевода (без вовлечения в воспалительный процесс), выстилка свища была представлена пищеводным эпителием. Более того, пациентка связывала появление болевого синдрома с приёмом пищи, а отделяемое из свищевого хода в поясничной области внешне было похоже на только что употреблённую пищу или напиток.

Достоверно определить первичный процесс не представляется возможным ввиду длительного течения заболевания. Принимая во внимание все полученные данные, можно предположить, что первичным процессом является всё-таки перфорация пищевода, а спондилит и паравертебральный абсцесс развились позже. Несмотря на то, что пациентка отрицает факт травмы пищевода, эндоскопическая картина наиболее характерна для травмы пищевода проглоченным инородным предметом (рыбья кость?).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на начальном этапе причина патологического процесса (свищ пищевода) не была выявлена, проводимое лечение при первичных госпитализациях пациентки (оперативные вмешательства и антибактериальная терапия) оказалось симптоматическим.

Большое количество современных визуализационных и хирургических методов не отменяет детального сбора анамнеза и сопоставления с клинической картиной.

Необходимо давать критическую оценку ранее установленных диагнозов (соответствует ли ранее выставленный диагноз диагностическим критериям), когда соответствующие методы лечения не дают ответа.

Важно проводить дифференциальную диагностику для систематической оценки возможных альтернативных диагнозов, прежде чем делать окончательное заключение.

Не стоит забывать и о частой логической ошибке вывода «после этого, значит вследствие этого» (лат. *post hoc ergo propter hoc*) — формулы неправильного умозаключения, принимающего смежность по времени за причинную связь.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении работы.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Вклад авторов. Авторы подтверждают соответствие своего авторства 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 распределён

следующим образом: В.А. Заря — сбор материала, написание статьи; П.В. Гаврилов — концепция и дизайн работы, финальное редактирование статьи; М.Е. Макогонова — анализ полученных данных, написание текста статьи; А.Р. Козак — сбор материала, написание статьи; А.А. Вишневский — концепция и дизайн исследования, финальное редактирование текста статьи.

Информированное согласие на публикацию. Авторы получили письменное согласие пациента на публикацию медицинских данных и фотографий в журнале Digital Diagnostics.

ADDITIONAL INFORMATION

Funding source. This article was not supported by any external sources of funding.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work. V.A. Zarya — collecting material, writing the article; P.V. Gavrilo — concept and design of the work, final editing; M.E. Makogonova — analysis of the data obtained, writing the text; A.R. Kozak — collecting material, writing the article; A.A. Vishnevskiy — concept and design of the work, final editing.

Consent for publication. Written consent was obtained from the patient for publication of relevant medical information and all of accompanying images within the manuscript in Digital Diagnostics Journal.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мушкин А.Ю., Вишневский А.А. Клинические рекомендации по диагностике инфекционных спондилитов (проект для обсуждения) // Медицинский альянс. 2018. № 3. С. 65–74.
2. Fowler V.G., Justice A., Moore C., et al. Risk factors for hematogenous complications of intravascular catheter-associated *Staphylococcus aureus* bacteremia // Clin Infect Dis. 2005. Vol. 40, N 5. P. 695–703. doi: 10.1086/427806
3. Lu Y.A., Hsu H.H., Kao H.K., et al. Infective spondylodiscitis in patients on maintenance hemodialysis: A case series // Ren Fail. 2017. Vol. 39, N 1. P. 179–186. doi: 10.1080/0886022X.2016.1256313
4. Choi K.B., Lee C.D., Lee S.H. Pyogenic spondylodiscitis after percutaneous endoscopic lumbar discectomy // J Korean Neurosurg Soc. 2010. Vol. 48, N 5. P. 455–460. doi: 10.3340/jkns.2010.48.5.455
5. Hsieh M.K., Chen L.H., Niu C.C., et al. Postoperative anterior spondylodiscitis after posterior pedicle screw instrumentation // Spine J. 2011. Vol. 11, N 1. P. 24–29. doi: 10.1016/j.spinee.2010.10.021
6. Hanci M., Toprak M., Sarioğlu A.C., et al. Oesophageal perforation subsequent to anterior cervical spine screw/plate fixation // Paraplegia. 1995. Vol. 33, N 10. P. 606–609. doi: 10.1038/sc.1995.128
7. Orlando E.R., Caroli E., Ferrante L. Management of the cervical esophagus and hypopharynx perforations complicating anterior cervical spine surgery // Spine. 2003. Vol. 28. P. E290–E295. doi: 10.1097/00007632-200308010-00023
8. Pompili A., Canitano S., Caroli F., et al. Asymptomatic esophageal perforation caused by late screw migration after anterior cervical plating: Report of a case and review of relevant literature // Spine. 2002. Vol. 27. P. E499–E502. doi: 10.1097/00007632-200212010-00016
9. Janssen I., Shibani E., Riemüller A., et al. Treatment considerations for cervical and cervicothoracic spondylodiscitis associated with esophageal fistula due to cancer history or accidental injury: A 9-patient case series // Acta Neurochir (Wien). 2019. Vol. 161, N 9. P. 1877–1886. doi: 10.1007/s00701-019-03985-3
10. Fonga-Djimi H., Leclerc F., Martinot A., et al. Spondylodiscitis and mediastinitis after esophageal perforation owing to a swallowed radiolucent foreign body // J Pediatr Surg. 1996. Vol. 31, N 5. P. 698–700. doi: 10.1016/s0022-3468(96)90677-6
11. Wadie G.M., Konefal S.H., Dias M.A., McLaughlin M.R. Cervical spondylodiscitis from an ingested pin: A case report // J Pediatr Surg. 2005. Vol. 40, N 3. P. 593–596. doi: 10.1016/j.jpedsurg.2004.11.023
12. Van Ooij A., Manni J.J., Beuls E.A., Walenkamp G.H. Cervical spondylodiscitis after removal of a fishbone. A case report // Spine (Phila Pa 1976). 1999. Vol. 24, N 6. P. 574–577. doi: 10.1097/00007632-199903150-00015

REFERENCES

1. Mushkin AY, Vishnevsky AA. Clinical recommendations for the diagnosis of infectious spondylitis (draft for discussion). *Medical Alliance*. 2018;(3):65–74. (In Russ).
2. Fowler VG, Justice A, Moore C, et al. Risk factors for hematogenous complications of intravascular catheter-associated *Staphylococcus aureus* bacteremia. *Clin Infect Dis*. 2005;40(5):695–703. doi: 10.1086/427806
3. Lu YA, Hsu HH, Kao HK, et al. Infective spondylodiscitis in patients on maintenance hemodialysis: A case series. *Ren Fail*. 2017;39(1):179–186. doi: 10.1080/0886022X.2016.1256313
4. Choi KB, Lee CD, Lee SH. Pyogenic spondylodiscitis after percutaneous endoscopic lumbar discectomy. *J Korean Neurosurg Soc*. 2010;48(5):455–460. doi: 10.3340/jkns.2010.48.5.455
5. Hsieh MK, Chen LH, Niu CC, et al. Postoperative anterior spondylodiscitis after posterior pedicle screw instrumentation. *Spine J*. 2011;11(1):24–29. doi: 10.1016/j.spinee.2010.10.021
6. Hanci M, Toprak M, Sarioğlu AC, et al. Oesophageal perforation subsequent to anterior cervical spine screw/plate fixation. *Paraplegia*. 1995;33(10):606–609. doi: 10.1038/sc.1995.128
7. Orlando ER, Caroli E, Ferrante L. Management of the cervical esophagus and hypopharynx perforations complicating anterior cervical spine surgery. *Spine*. 2003;28:E290–E295. doi: 10.1097/00007632-200308010-00023
8. Pompili A, Canitano S, Caroli F, et al. Asymptomatic esophageal perforation caused by late screw migration after anterior cervical plating: Report of a case and review of relevant literature. *Spine*. 2002;27:E499–E502. doi: 10.1097/00007632-200212010-00016
9. Janssen I, Shibani E, Riemüller A, et al. Treatment considerations for cervical and cervicothoracic spondylodiscitis associated with esophageal fistula due to cancer history or accidental injury: A 9-patient case series. *Acta Neurochir (Wien)*. 2019;161(9):1877–1886. doi: 10.1007/s00701-019-03985-3
10. Fonga-Djimi H, Leclerc F, Martinot A, et al. Spondylodiscitis and mediastinitis after esophageal perforation owing to a swallowed radiolucent foreign body. *J Pediatr Surg*. 1996;31(5):698–700. doi: 10.1016/s0022-3468(96)90677-6
11. Wadie GM, Konefal SH, Dias MA, McLaughlin MR. Cervical spondylodiscitis from an ingested pin: A case report. *J Pediatr Surg*. 2005;40(3):593–596. doi: 10.1016/j.jpedsurg.2004.11.023
12. Van Ooij A, Manni JJ, Beuls EA, Walenkamp GH. Cervical spondylodiscitis after removal of a fishbone. A case report. *Spine (Phila Pa 1976)*. 1999;24(6):574–577. doi: 10.1097/00007632-199903150-00015

ОБ АВТОРАХ

* **Гаврилов Павел Владимирович**, канд. мед. наук;
адрес: Россия, 191036, Санкт-Петербург, Лиговский пр-т, д. 2-4;
ORCID: 0000-0003-3251-4084;
eLibrary SPIN: 7824-5374;
e-mail: spbniifrentgen@mail.ru

Заря Валерия Алексеевна;
ORCID: 0000-0001-7956-3719;
e-mail: zariandra@mail.ru

Макогонова Марина Евгеньевна, канд. мед. наук;
ORCID: 0000-0001-6760-2426;
eLibrary SPIN: 6342-8967;
e-mail: MakogonovaME@gmail.com

Козак Андрей Романович, канд. мед. наук;
ORCID: 0000-0002-3192-1430;
e-mail: andrkozak@mail.ru

Вишневский Аркадий Анатольевич, д-р мед. наук;
ORCID: 0000-0002-9186-6461;
eLibrary SPIN: 4918-1046;
e-mail: vichnevsky@mail.ru

AUTHORS' INFO

* **Pavel V. Gavrilov**, MD, Cand. Sci. (Med.);
address: 2-4 Ligovskiy avenue, 191036 Saint Petersburg, Russia;
ORCID: 0000-0003-3251-4084;
eLibrary SPIN: 7824-5374;
e-mail: spbniifrentgen@mail.ru

Valeriya A. Zarya;
ORCID: 0000-0001-7956-3719;
e-mail: zariandra@mail.ru

Marina E. Makogonova, MD, Cand. Sci. (Med.);
ORCID: 0000-0001-6760-2426;
eLibrary SPIN: 6342-8967;
e-mail: MakogonovaME@gmail.com

Andrey R. Kozak, MD, Cand. Sci. (Med.);
ORCID: 0000-0002-3192-1430;
e-mail: andrkozak@mail.ru

Arkadiy A. Vishnevskiy, MD, Dr. Sci. (Med.);
ORCID: 0000-0002-9186-6461;
eLibrary SPIN: 4918-1046;
e-mail: vichnevsky@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD340815>

Прецизионная брахитерапия рака предстательной железы под контролем ПСМА-рецепторной молекулярной визуализации

П.В. Свиридов¹, П.О. Румянцев², М.В. Дегтярев³, С.С. Серженко³, Д.Б. Санин^{1, 4},
С.В. Стыров¹, Д.Ю. Агибалов¹, С.В. Корнев⁵

¹ Медицинский центр «Доктор Плюс», Обнинск, Российская Федерация;

² Группа клиник «Мой медицинский центр», Санкт-Петербург, Российская Федерация;

³ Национальный медицинский исследовательский центр эндокринологии, Москва, Российская Федерация;

⁴ Национальный медицинский исследовательский центр радиологии, Обнинск, Российская Федерация;

⁵ Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Одним из методов лечения локализованного рака предстательной железы без признаков прорастания капсулы железы и в отсутствии признаков метастазов (стадия cT1-T2N0M0) является брахитерапия с имплантацией микроисточников на основе изотопа ¹²⁵I. Методы структурной визуализации (ультразвуковое исследование; компьютерная томография, КТ; магнитно-резонансная томография, МРТ) не обладают высокой специфичностью в дифференциальной диагностике рака предстательной железы. Гибридные технологии лучевой визуализации (однофотонная эмиссионная компьютерная томография + компьютерная томография, ОФЭКТ/КТ; позитронно-эмиссионная томография + компьютерная томография, ПЭТ-КТ; позитронно-эмиссионная томография + магнитно-резонансная томография, ПЭТ/МРТ) сочетают в себе достоинства высокой чувствительности кросс-секционных методов структурной визуализации (КТ и МРТ) и высокой специфичности методов молекулярной визуализации (ОФЭКТ, ПЭТ) с туморотропными радиофармацевтическими лекарственными препаратами.

В данной работе на 7 клинических наблюдениях локализованного рака предстательной железы (шкала Глисона 6–7) показано, что прецизионность низкодозной брахитерапии микроисточниками ¹²⁵I локализованных карцином предстательной железы, равно как и прицельной биопсии, может быть повышена при использовании гибридных методов ПСМА-рецепторной (простатспецифический мембранный антиген) молекулярной визуализации (ОФЭКТ/КТ, ПЭТ/КТ). Метод ОФЭКТ/КТ более доступен, чем ПЭТ/КТ, и при наличии холодных наборов (HYNIC-PSMA) позволяет выполнять исследование в любой лаборатории радиоизотопной диагностики, располагающей соответствующими сканерами.

Инновационная технология ПСМА-навигационной биопсии и брахитерапии под контролем гибридной молекулярной визуализации может применяться при первичных и рецидивных случаях локализованного рака предстательной железы, увеличивает точность и снижает травматичность процедур, повышает медико-экономическую эффективность низкодозной брахитерапии микроисточниками ¹²⁵I.

Необходимы дальнейшие исследования для совершенствования технологии и оценки отдалённых результатов лечения на многочисленной группе пациентов.

Ключевые слова: брахитерапия низкодозная прецизионная; йод-125; простатспецифический мембранный антиген; ПСМА; однофотонная эмиссионная компьютерная томография, совмещённая с компьютерной томографией; ОФЭКТ/КТ; позитронно-эмиссионная томография, совмещённая с компьютерной томографией; ПЭТ/КТ.

Как цитировать:

Свиридов П.В., Румянцев П.О., Дегтярев М.В., Серженко С.С., Санин Д.Б., Стыров С.В., Агибалов Д.Ю., Корнев С.В. Прецизионная брахитерапия рака предстательной железы под контролем ПСМА-рецепторной молекулярной визуализации // *Digital Diagnostics*. 2023. Т. 4, № 3. С. 411–426.
DOI: <https://doi.org/10.17816/DD340815>

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD340815>

Precision low-dose brachytherapy of prostate cancer under PSMA-receptor molecular visualization

Pavel V. Sviridov¹, Pavel O. Rumiantsev², Mikhail V. Degtyarev³, Sergey S. Serzhenko³, Dmitry B. Sanin^{1, 4}, Sergey V. Styrov¹, Dmitry Yu. Agibalov¹, Sergey V. Korenev⁵

¹ Medical center "Doctor Plus", Obninsk, Russian Federation;

² Clinics group "My Medical Center", Saint Petersburg, Russian Federation;

³ Endocrinology Research Centre, Moscow, Russian Federation;

⁴ National Medical Research Radiological Center, Obninsk, Russian Federation;

⁵ I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russian Federation

ABSTRACT

Brachytherapy with implantation of micro sources based on isotope ¹²⁵I is a preferred treatment for localized prostate cancer without signs of germination of the gland capsule and in the absence of signs of metastases (stage cT1-T23aN0M0). Structural imaging methods (ultrasound, computed tomography, and magnetic resonance imaging) do not have high specificity in the differential diagnosis of prostate cancer. Hybrid technologies of radiation imaging (single-photon emission computed tomography/computed tomography, positron emission tomography/computed tomography, and positron emission tomography/magnetic resonance imaging) combine the advantages of high sensitivity of cross-sectional structural imaging methods (computed tomography and magnetic resonance imaging) and high specificity of molecular imaging methods (single-photon emission computed tomography and positron emission tomography) with tumorotropic radiopharmaceuticals. In this original clinical study, based on seven observations of localized prostate cancer (Gleason 6–7), it was shown that the precision of low-dose brachytherapy using ¹²⁵I micro sources of localized prostate carcinomas, along with targeted biopsy, can be increased using hybrid methods of PSMA-receptor molecular imaging (single-photon emission computed tomography/ computed tomography, positron emission tomography/ computed tomography). The single-photon emission computed tomography/ computed tomography method is more accessible than positron emission tomography/ computed tomography. Moreover, when coupled with cold kits (HYNIC-PSMA), it allows research within any radioisotope diagnostics laboratory equipped with single-photon emission computed tomography/ computed tomography. The innovative technology of PSMA-navigation biopsy and brachytherapy, under the control of hybrid molecular imaging, can be used in primary and recurrent cases of localized prostate cancer, increases the accuracy and reduces the traumatic nature of procedures, and increases the medical and economic efficiency of low-dose brachytherapy with ¹²⁵I micro sources. Further research is needed to improve the technology and evaluate its long-term results.

Keywords: brachytherapy low-dose rate precision; ¹²⁵I; prostate-specific membrane antigen; PSMA; single-photon emission computed tomography / computed tomography; positron emission tomography / computed tomography.

To cite this article:

Sviridov PV, Rumiantsev PO, Degtyarev MV, Serzhenko SS, Sanin DB, Styrov SV, Agibalov DY, Korenev SV. Precision low-dose brachytherapy of prostate cancer under PSMA-receptor molecular visualization. *Digital Diagnostics*. 2023;4(3):411–426. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD340815>

Received: 18.04.2023

Accepted: 20.07.2023

Published: 25.08.2023

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD340815>

在PSMA受体分子成像控制下的前列腺癌精确近距离照射

Pavel V. Sviridov¹, Pavel O. Rumiantsev², Mikhail V. Degtyarev³, Sergey S. Serzhenko³, Dmitry B. Sanin^{1,4}, Sergey V. Styrov¹, Dmitry Yu. Agibalov¹, Sergey V. Korenev⁵

¹ Medical center "Doctor Plus", Obninsk, Russian Federation;

² Clinics group "My Medical Center", Saint Petersburg, Russian Federation;

³ Endocrinology Research Centre, Moscow, Russian Federation;

⁴ National Medical Research Radiological Center, Obninsk, Russian Federation;

⁵ I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russian Federation

简评

治疗无腺囊萌发迹象和无转移迹象（cT1-T2N0M0期）的局部前列腺癌的方法之一是植入基于同位素¹²⁵I的微源近距离照射。结构成像方法（超声检查、电子计算机断层扫描（CT）、磁共振成像（MRI））在前列腺癌的鉴别诊断中特异性不高。混合放射成像技术（单光子发射计算机断层扫描+电子计算机断层扫描，SPECT/CT；正电子发射计算机断层扫描+电子计算机断层扫描，PET/CT；正电子发射断层扫描+磁共振成像，PET/MRI）结合了结构成像的横断面方法（CT和MRI）的高灵敏度和分子成像方法（SPECT、PET）的高特异性与肿瘤放射治疗物的优点。

在这项研究中，7例局部前列腺癌（格里森评分为6-7分）的临床观察结果表明了，通过使用PSMA受体（前列腺特异性膜抗原）分子成像（SPECT/CT、PET/CT）的混合方法，可以提高使用微源¹²⁵I对局部前列腺癌进行低剂量近距离照射以及靶向活检的精确度。SPECT/CT比PET/CT更经济实惠，而且在存在冷试剂盒（HYNIC-PSMA）的情况下，允许在任何拥有适当扫描仪的放射性同位素诊断实验室进行检查。

混合分子成像控制下的PSMA引导活检和近距离照射创新技术可用于原发性和复发性的局部前列腺癌病例，提高准确度，减少检查创伤性，提高微源¹²⁵I低剂量近距离照射的医疗和经济效益。

还需要进一步的研究来改进这种技术，并对大量患者的长期治疗效果进行评估。

关键词：精确低剂量近距离照射；碘125；前列腺特异性膜抗原；PSMA；联合电子计算机断层扫描的单光子发射计算机断层扫描；SPECT/CT；联合电子计算机断层扫描的正电子发射计算机断层扫描；PET/CT。

引用本文：

Sviridov PV, Rumiantsev PO, Degtyarev MV, Serzhenko SS, Sanin DB, Styrov SV, Agibalov DYU, Korenev SV. 在PSMA受体分子成像控制下的前列腺癌精确近距离照射. *Digital Diagnostics*. 2023;4(3):411-426. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD340815>

收到: 18.04.2023

接受: 20.07.2023

发布日期: 25.08.2023

АКТУАЛЬНОСТЬ

Рак предстательной железы занимает второе место по частоте заболеваемости и пятое — среди причин смертности от злокачественных новообразований мужского населения в мире [1]. Скрининг рака предстательной железы по уровню простатспецифического антигена (ПСА) в крови повышает число выявленных на ранней стадии, локализованных в предстательной железе карцином, что значительно улучшает прогноз выживаемости пациентов [2].

Одним из методов лечения локализованного рака предстательной железы без признаков прорастания её капсулы и в отсутствии метастазов (стадия cT1-T2N0M0) является брахитерапия с имплантацией микроисточников на основе изотопа йод-125 (^{125}I) [3–8].

При брахитерапии доза облучения формируется пространственным распределением микроисточников в момент имплантации в проекции первичной карциномы предстательной железы под контролем компьютерной томографии (КТ) или ультразвукового исследования (УЗИ). Имплантированные микроисточники фиксируются в ткани, что предохраняет от облучения окружающих здоровых тканей. При этом безопасные границы облучения (2–3 мм) по периферии микроисточников не приводят к побочному облучению органов риска, таких как уретра, мочевого пузыря, прямая кишка, повреждение которых неизбежно при простатэктомии, дистанционной лучевой терапии и высокодозной брахитерапии. В ряде исследований пациентов с раком предстательной железы групп низкого и умеренного риска рецидива опухоли продемонстрирована лучшая абляция опухоли, чем при дистанционной лучевой терапии [4, 5]. Эффективность низкодозной брахитерапии в лечении пациентов с локализованным раком предстательной железы (pT1-T2N0M0) как минимум не уступает любому другому современному методу лечения, в то время как переносимость и качество жизни пациентов существенно выше [9]. Если в начале 2000-х годов в группе умеренного риска в целях бустирования низкодозная брахитерапия комбинировалась с дистанционной лучевой терапией, то в последние десятилетия чаще применяется в качестве самостоятельного метода лечения [10].

Преимуществом метода брахитерапии являются его малоинвазивность (пункционная технология) и возможность контроля процесса установки микроисточников методами структурной визуализации (УЗИ, КТ), низкая частота и степень выраженности нежелательных явлений [11].

Гибридные технологии лучевой визуализации, такие как однофотонная эмиссионная КТ, совмещённая с КТ (ОФЭКТ/КТ), позитронно-эмиссионная томография, совмещённая с КТ (ПЭТ/КТ), позитронно-эмиссионная томография, совмещённая с магнитно-резонансной томографией (ПЭТ/МРТ), сочетают в себе достоинства высокой

чувствительности кросс-секционных методов структурной визуализации (КТ, МРТ) и высокой специфичности методов молекулярной визуализации (ОФЭКТ, ПЭТ) с туморотропными радиофармацевтическими лекарственными препаратами (РФЛП).

Простатспецифический мембранный антиген (ПСМА; англ. prostate-specific membrane antigen, PSMA) у человека кодируется геном *FOLH1* и участвует в метаболизме фолатов. Он известен также как N-ацетил-L-аспартил-L-глутаматпептидаза, или глутамат-карбоксипептидаза II, и является цинксодержащим трансмембранным гликопротеином, экспрессированным в клетках эпителия предстательной железы. Его экспрессия значительно возрастает в злокачественных клетках, а степень экспрессии напрямую коррелирует со степенью агрессивности опухоли, особенно при кастрационно-резистентном и метастатическом раке предстательной железы [12].

ПСМА-рецепторные методы молекулярной визуализации (ОФЭКТ и ПЭТ) предоставляют дополнительные преимущества в уточнении стадии опухоли и выборе объектов для прецизионной биопсии и брахитерапии карциномы предстательной железы [13]. В отечественной клинической практике доступны ПЭТ/КТ с ^{68}Ga -PSMA-11 (изотоп галлия-68) и ^{18}F -PSMA-1007 (18 F-простатспецифический мембранный антиген-1007), а также ОФЭКТ/КТ с $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -HYNIC-PSMA (меченный технецием-99m низкомолекулярный ингибитор простатспецифического мембранного антигена). Последний метод представляется нам высокоперспективным ввиду его более широкой доступности (сканеров ОФЭКТ/КТ намного больше, чем ПЭТ/КТ), удобства применения и меньшей затратности, а также ряда технологических преимуществ для обеспечения надлежащей прецизионности при биопсии и брахитерапии локализованного рака предстательной железы.

ОПИСАНИЕ КЛИНИЧЕСКИХ СЛУЧАЕВ

О пациентах

В работе рассматриваются результаты лечения 7 пациентов в возрасте от 65 до 84 лет (в среднем 73 года [95% доверительный интервал 66,8–79,2]) с гистологически подтверждённым раком предстательной железы, которым была выполнена брахитерапия микроисточниками на основе изотопа ^{125}I в клинике «Доктор-Плюс» г. Обнинска Калужской области. У всех пациентов гистологически верифицирована карцинома предстательной железы без признаков регионарных и/или отдалённых метастазов. Первичных пациентов было 5, ещё у 2 пациентов имелся местный рецидив опухоли через 21 и 28 месяцев после брахитерапии микроисточниками ^{125}I . У 2 пациентов стадия опухоли соответствовала T1N0M0, у 4 — T2N0M0, у 1 — T3aN0M0. В последнем случае пациент отказался от предложенного хирургического лечения, в том числе от комбинированной дистанционной лучевой и андрогенной депривационной терапии.

Оценка по шкале Глисона в 5 наблюдениях составила 6 (3+3) баллов, в 2 — 7 (3+4) баллов. Концентрация ПСА в крови до брахитерапии варьировала от 2,8 до 12 нг/мл (в среднем 8,2 нг/мл).

Методы исследования

Пациентам с местным рецидивом опухоли на первом этапе проводилась внутритканевая лучевая терапия микроисточниками ¹²⁵I. Период до прогрессирования колебался в пределах 12–29 месяцев (24,2 [95% ДИ 17,8–30,5]).

Клиническое обследование включало стандартное определение уровня ПСА в сыворотке крови. Образец венозной крови брали утром натощак со стандартными рекомендациями по подготовке к исследованию. Концентрацию ПСА в сыворотке крови определяли с помощью хемилюминесцентного иммуноанализа (границы чувствительности метода — 0,008–30,0 нг/мл).

УЗИ выполняли на аппарате В/К Medical (США) методом ТрУЗИ (трансректальная ультразвуковая диагностика) с определением объема предстательной железы и объема остаточной мочи. Урофлоуметрию проводили с целью оценки максимальной объемной скорости мочеиспускания.

Рентгеновскую КТ органов малого таза с внутривенным контрастным усилением (Омнипак 350 мг/мл, объем 30 мл) в экскреторную фазу для улучшения визуализации анатомии органов риска выполняли на мультиспиральном (32 среза) компьютерном томографе производства компании Siemens (Германия) модели Somatom Score с последующим переносом данных в программу планирования внутритканевой лучевой терапии.

Радионуклидное исследование с РФЛП ^{99m}Tc-HYNIC-PSMA проводили на гибридном томографе General Electric Discovery NM/CT 670. Готовый РФЛП вводили пациенту внутривенно под контролем веновизора (контроль интравазальности введения) из расчёта 6,3 МБк на килограмм веса тела. Через 2 часа после введения РФЛП в гамма-камере ОФЭКТ/КТ выполняли сканирование тазовой области: 60 проекций с экспозицией 30 секунд на проекцию, матрица 256×256. Параметры сбора данных КТ: напряжение трубки 120 кВ, сила тока (модулируемая) 80–400 мА, толщина среза 3,75 мм с реконструкцией 1,25 мм, шаг стола 1 мм. На рабочей станции обработки данных General Electric Xeleris 4DR анализировали полученное

трёхмерное изображение ОФЭКТ/КТ. Выявленные фокусы очагового накопления РФЛП в предстательной железе отмечали на схематическом изображении карты секторов предстательной железы PI-RADS.

Биопсию выполняли трансперинеальным методом под контролем УЗИ (с учётом картины на ОФЭКТ/КТ с ^{99m}Tc-HYNIC-PSMA) биопсийной иглой и пистолетом Promag 2.0 без анестезии; в случае необходимости биопсия предстательной железы и семенных пузырьков проводилась параректальным доступом под спинальной анестезией и КТ-контролем. Гистологическое исследование биоптата выполнялось в лабораториях патологической анатомии с определением суммы баллов по Глисон.

Планирование и проведение брахитерапии источниками ¹²⁵I

Топографию и дозиметрическое планирование проводили накануне процедуры имплантации с применением метода предимплантационного планирования на системе дозиметрического планирования VariSeed (Varian, США) с возможностью совмещения изображений различных модальностей в формате DICOM.

Для выполнения прицельной брахитерапии использовали микроисточники с изотопом ¹²⁵I, которые имплантировались под контролем КТ на аппарате Siemens Somatom Score (Германия) с применением 3D-стереотаксической приставки с шагом между отверстиями 2,5 мм. Процедура проводилась под спинальной анестезией параректальным доступом.

На рис. 1 представлен пример предимплантационного планирования брахитерапии источниками ¹²⁵I. Крестиками обозначены виртуальные отверстия стереотаксической решётки, которая полностью соответствует решётке, установленной на пациенте. Красные точки — это непосредственно микроисточники, цветные линии — распределение изодоз.

Для внутритканевой имплантации использовали микроисточники с ¹²⁵I в форме зёрен отечественного производства (ООО «БЕБИГ»). Длина каждого источника — 4,5 мм, диаметр — 0,8 мм. Количество источников для пациентов заказывали индивидуально по результатам комплексного обследования и дозиметрического планирования. табл. 1.

Таблица 1. Демографическая и клиничко-морфологическая характеристика пациентов

Возраст ¹ , лет	Опухоль			Объём ПЖ / объём опухоли ПЖ, мл	Локализация в ПЖ ⁴	Плановое количество микроисточников ¹²⁵ I / временные затраты на процедуру ⁵	Плановое количество микроисточников ¹²⁵ I / временные затраты на процедуру ⁶
	Стадия, TNM ²	Первичный случай или рецидив ³	По шкале Глисона, балл				
Пациент 1, 84 года	T2N0M0	Первичный	7 (4+3)	40/40	пр. доля T2a (mid)	60 75 мин	60 75 мин
Пациент 2, 79 лет	T2N0M0	Первичный	6 (3+3)	38/15	пр. доля T2a (apex), лев. доля T2p (mid)	60 75 мин	20 25 мин

Таблица 1. Окончание

Возраст ¹ , лет	Опухоль			Объём ПЖ / объём опухоли ПЖ, мл	Локализация в ПЖ ⁴	Плановое количество микроисточников ¹²⁵ I / временные затраты на процедуру ⁵	Плановое количество микроисточников ¹²⁵ I / временные затраты на процедуру ⁶
	Стадия, TNM ²	Первичный случай или рецидив ³	По шкале Глисона, балл				
Пациент 3, 73 года	T1N0M0	Первичный	6 (3+3)	36/14	пр. доля TZa (apex), лев. доля PZpl (base) PZpl (mid)	70 87 мин	32 45 мин
Пациент 4, 68 лет	T3N0M0	Рецидив	7 (4+3)	38/15	пр. доля TZp, PZpl (base)	60 75 мин	20 25 мин
Пациент 5, 70 лет	T2N0M0	Рецидив	6 (3+3)	30/15	пр. доля PZpl (mid)	70 87 мин	30 40 мин
Пациент 6, 65 лет	T1N0M0	Первичный	7 (4+3)	60/15	пр. доля TZa (mid)	90 112 мин	30 40 мин
Пациент 7, 69 лет	T2N0M0	Первичный	6 (3+3)	78/78	пр. доля TZa (apex), лев. доля PZpl (base) PZpl (mid)	32 45 мин	90 112 мин

Примечание. ¹ — возраст пациента на момент лечения; ² — UICC, 8th ed. (https://oncology.ru/specialist/treatment/tnm/tnm8_summary.pdf); ³ — метод первичного лечения; ⁴ — международный стандарт; ⁵ — без визуализации опухоли методом ОФЭКТ/КТ; ⁶ — под контролем ПСМА/ОФЭКТ/КТ. TZa (mid/apex) — передняя переходная зона (средняя/апикальная часть); TZp (mid) — задняя переходная зона (средняя часть); PZpl (mid/base) — задняя зона (средняя/базальная часть). ПЖ — предстательная железа; ОФЭКТ/КТ — однофотонная эмиссионная компьютерная томография, совмещённая с компьютерной томографией; ПСМА — простатспецифический мембранный антиген.

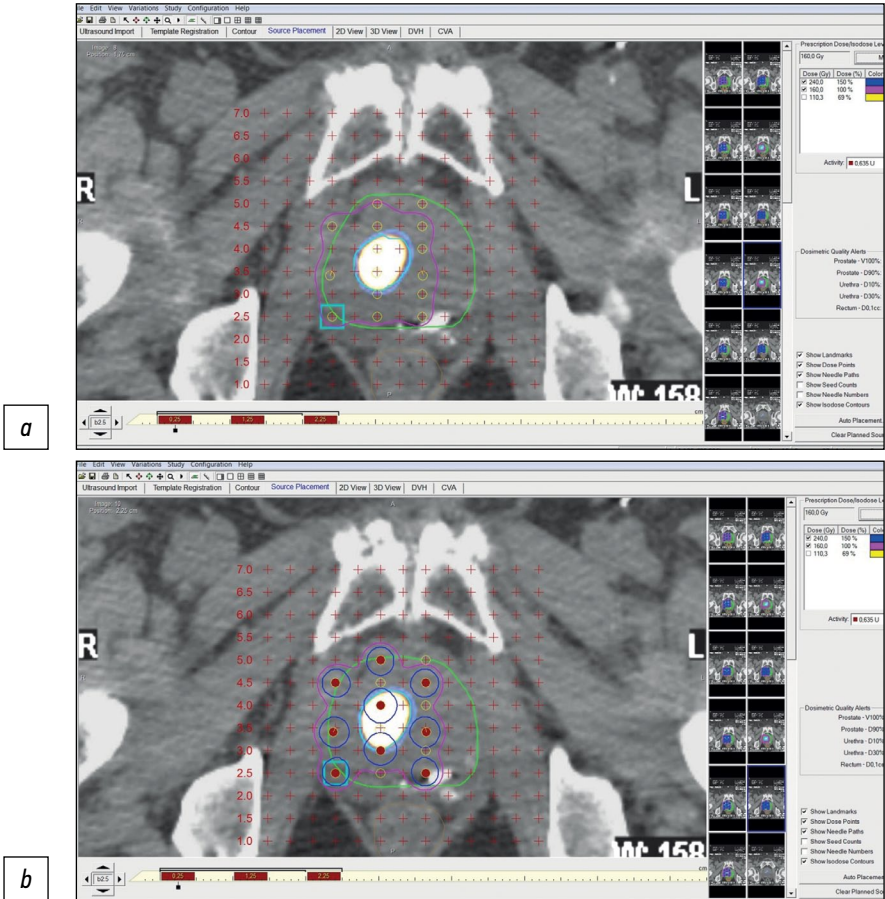


Рис. 1. Этапы дозиметрического планирования брахитерапии микроисточниками ¹²⁵I локализованного рака предстательной железы с учётом ОФЭКТ/КТ с ^{99m}Tc-HYNIC-PSMA: *a* — топометрическая разметка; *b* — топометрическая разметка и дозиметрическое планирование брахитерапии.

Подготовка пациента к брахитерапии включала подготовку кишечника и антибактериальную терапию; для обезболивания применяли метод спинальной анестезии путём введения лидокаина/бупивакаина.

Процедура имплантации осуществлялась согласно принятым в 2014 году рекомендациям [12]. Контроль размещения микроисточников ^{125}I осуществлялся визуально при контрольных сканированиях и реконструкции получаемых изображений.

Пациентов выписывали на следующий день после процедуры брахитерапии, и в течение 3–5 дней они возвращались к обычной жизнедеятельности. Никому из пациентов не потребовались катетеризация мочевого пузыря или наложение эпицистостомы. Незначительное затруднение мочеиспускания нивелировалось назначением альфа-блокаторов в общепринятых дозировках. Лучевых реакций, как ранних, так и поздних, не отмечено.

Длительность процедуры брахитерапии зависела от количества имплантируемых микроисточников ^{125}I и варьировала от 25 до 112 минут (в среднем 51,7 минут), что было на 1/3 (34,8%) меньше среднего расчётного времени (79,4 минут) при стандартной процедуре (без ПСМА-ОФЭКТ/КТ-навигации).

Серьёзных осложнений лечения в ближайшем и отдалённом периодах (в среднем 24,5 месяцев) не наблюдалось. У 2 пациентов в течение нескольких дней после процедуры имелись дизурические явления слабой степени выраженности, не потребовавшие установки катетера или лекарственной терапии и разрешившиеся спонтанно.

Клинический случай 1

Пациент Ж., 84 года, поступил с диагнозом «Рак предстательной железы, ПСА 20 нг/мл, аденокарцинома, Глисон 7 (4+3)». Внутритканевая лучевая терапия предстательной железы ^{125}I параректальным доступом под КТ-контролем с учётом картины ОФЭКТ/КТ выполнена

09.10.2020. Через 2 года уровень ПСА составил 0,16 нг/мл; ремиссия опухоли. На 14.01.2023 — ПСА 0,1 нг/мл.

На рис. 2 представлен результат ОФЭКТ/КТ с $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -HYNIC-PSMA.

Клинический случай 2

Пациент З., 79 лет, поступил с диагнозом «Диффузная гиперплазия предстательной железы, уровень ПСА 4,5 нг/мл». По данным УЗИ, ТрУЗИ и МРТ с контрастированием патологических очагов в ткани железы не обнаружено. По результатам ОФЭКТ/КТ с $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -HYNIC-PSMA выявлены очаги накопления РФЛП в ткани железы объёмом 15 мм³ (рис. 3). Выполнение биопсии предстательной железы под контролем УЗИ невозможно по причине ампутации прямой кишки, поэтому выполнена прицельная биопсия параректальным доступом под контролем КТ. Получено морфологическое заключение: «Аденокарцинома, Глисон 6 (3+3)».

Имплантация радиоактивных источников ^{125}I произведена 28.01.2021 параректально под КТ-контролем. ПСА при повторном обследовании: сентябрь, 2022 — 0,2 нг/мл, 14.01.2023 — 0,1 нг/мл.

В данном клиническом случае мы столкнулись с двумя проблемами: неизвестный источник повышения уровня ПСА в динамике и невозможность выполнения прицельной биопсии очага карциномы в предстательной железе под контролем УЗИ. Применение гибридного ОФЭКТ/КТ с $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -HYNIC-PSMA с последующей биопсией очага накопления РФЛП под контролем КТ позволило успешно разрешить обе проблемы, а прецизионная брахитерапия с учётом картины ОФЭКТ/КТ была выполнена меньшим количеством микроисточников ^{125}I .

Клинический случай 3

Пациент К., 73 года, поступил с диагнозом «Диффузная гиперплазия предстательной железы, задержка мочи, эпицистостома, ПСА 12,7 нг/мл». Многоместная биопсия

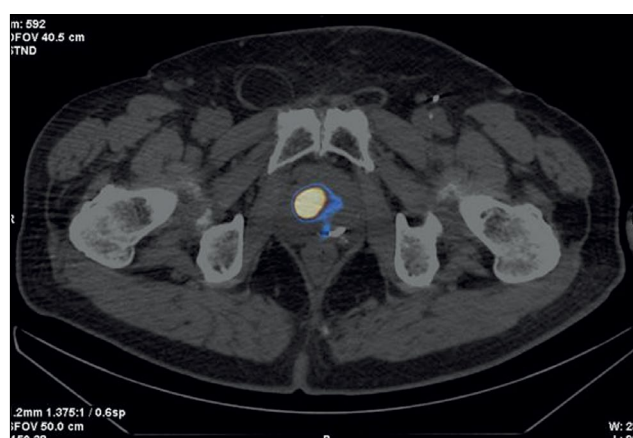


Рис. 2. Пациент Ж., 84 года. ОФЭКТ/КТ с $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -HYNIC-PSMA, аксиальная проекция: очаг накопления радиофармпрепарата в транзитной зоне средней части правой доли предстательной железы.

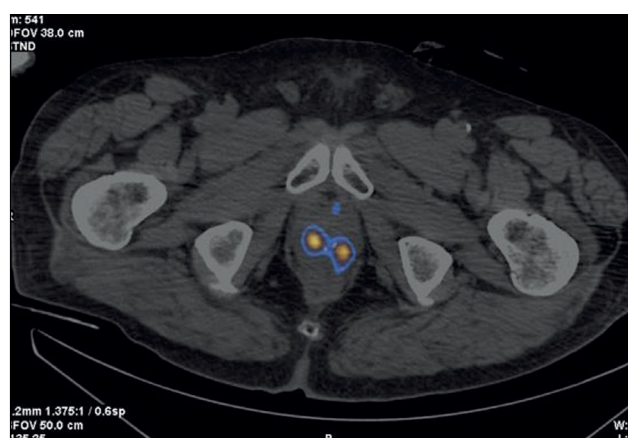


Рис. 3. Пациент З., 79 лет. ОФЭКТ/КТ с $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -HYNIC-PSMA: очаги накопления радиофармпрепарата в транзитных зонах обеих долей на границе средней трети и верхушки предстательной железы.



Рис. 4. Пациент К., 73 года. ОФЭКТ/КТ с ^{99m}Tc -HYNIC-PSMA, фронтальный (а) и аксиальный (b) срезы: очаги накопления радиофармпрепарата в передней части переходной зоны в вершине правой доли, в заднелатеральной части периферической зоны на уровне основания левой доли, в заднелатеральной части периферической зоны на уровне основания и средней трети левой доли предстательной железы; физиологическое накопление радиофармпрепарата в мочевом пузыре.

под контролем УЗИ не подтвердила злокачественного роста. Картина ОФЭКТ/КТ с ^{99m}Tc -HYNIC-PSMA отражена на рис. 4. На ОФЭКТ/КТ обнаружен очаг накопления РФЛП в ткани железы размером 14 мм³. Проведена прицельная биопсия параректальным доступом под контролем КТ. Получено морфологическое подтверждение: «Аденокарцинома, Глисон 6 (3+3)».

Фокальная имплантация радиоактивных источников ^{125}I проведена 28.11.2020 параректально под КТ-контролем. Выполнена трансуретральная резекция внутрипузырного компонента, эпицистостома удалена. При повторном исследовании (28.11.2022): ПСА 0,13 нг/мл, мочеиспускание самостоятельное, остаточная моча в объёме 15 см³.

В данном клиническом примере имели место следующие проблемы: невозможность выявить причину повышенного ПСА, «большой» объём железы и эпицистостома. Гибридное применение РФЛП в диагностике и технология биопсии под КТ-навигацией позволили с успехом решить эти проблемы, а фокальная брахитерапия, проведённая с учётом данных накопления РФЛП и биопсии, дала свой результат.

Клинический случай 4

Пациент Ф., 68 лет, поступил с диагнозом «Рак предстательной железы, Т3а, распространение на капсулу железы; в 2013 году проведена имплантация источников ^{125}I в ткань железы и закапсульное пространство. С конца 2020 года отмечен рост ПСА». По поводу повышения ПСА до 0,95–2,8 нг/мл после проведённого ранее лечения выполнена ОФЭКТ/КТ с ^{99m}Tc -HYNIC-PSMA (рис. 5). На ОФЭКТ/КТ выявлена зона накопления туморотропного РФЛП объёмом 15 мм³, биопсия которого выполнена под КТ-навигацией. Гистологическое заключение: «Аденокарцинома предстательной железы, Глисон 6 (3+3)». Дозиметрическое планирование брахитерапии источниками низкой мощности дозы на основе изотопа ^{125}I проведено на основе ОФЭКТ/КТ. Реимплантация

микроисточников ^{125}I произведена 11.03.2021 согласно топометрической разметке для реализации дозиметрического плана. При контрольном обследовании (23.01.2023) уровень ПСА 0,05 нг/мл.

В данном клиническом наблюдении ОФЭКТ/КТ с ^{99m}Tc -HYNIC-PSMA позволило выполнить прецизионную биопсию, подтвердившую локальный рецидив рака предстательной железы, и затем повторную (спасительную) брахитерапию под КТ-контролем.

Клинический случай 5

Пациент Г., 70 лет, поступил с диагнозом «Рак предстательной железы, установлен в 2005 году; Т2а, аденокарцинома, Глисон 6 (3+3)». Брахитерапия под КТ-контролем успешно выполнена в 2005 году, с 2017 года отмечается рост ПСА (1,94–2,31 нг/мл). На фоне этого роста выполнено обследование в объёме УЗИ, ТрУЗИ, КТ

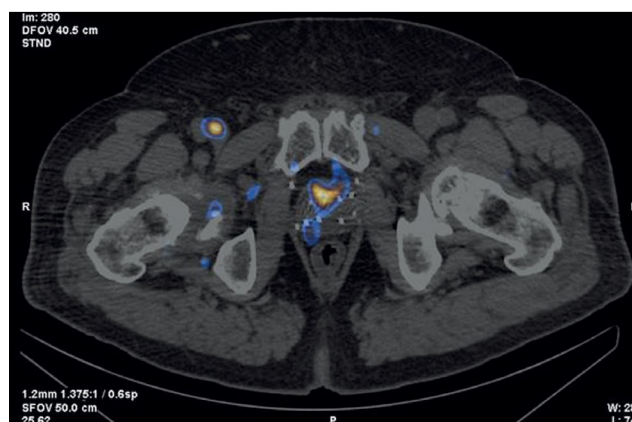


Рис. 5. Пациент Ф., 68 лет, ОФЭКТ/КТ с ^{99m}Tc -HYNIC-PSMA: очаги накопления радиофармпрепарата на границе центральной зоны и заднелатеральной части периферической зоны справа на уровне основания правой доли предстательной железы. На скане визуализируются множественные стержни в предстательной железе, имплантированные при ранее проведённой брахитерапии.

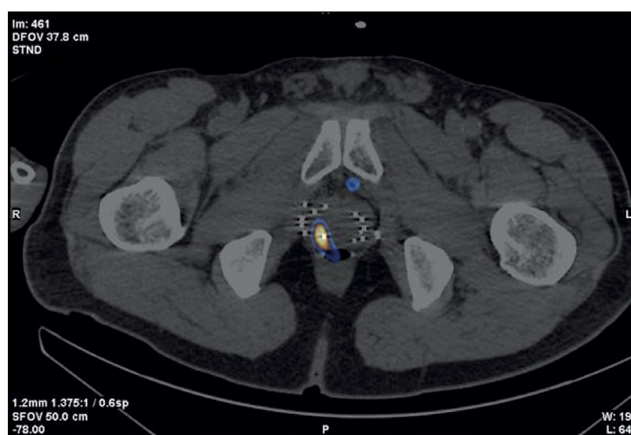


Рис. 6. Пациент Г., 70 лет, ОФЭКТ/КТ с ^{99m}Tc -HYNIC-PSMA: очаг накопления радиофармпрепарата в заднелатеральном отделе периферической зоны средней части правой доли предстательной железы. Множественные стержни в предстательной железе, имплантированные при ранее проведенной брахитерапии.



Рис. 7. Пациент М., 65 лет, ОФЭКТ/КТ с ^{99m}Tc -HYNIC-PSMA: очаг накопления радиофармпрепарата в транзитной зоне (на границе средней трети и основания) левой доли предстательной железы.

и МРТ с контрастированием: данных за местный рецидив или иной источник роста ПСА не получено. При уровне ПСА 2,63 нг/мл выполнена ОФЭКТ/КТ с ^{99m}Tc -HYNIC-PSMA (рис. 6). Полученные данные о локальном накоплении РФЛП объемом 15 мм³ позволили выполнить прицельную биопсию рецидивного очага карциномы предстательной железы с учетом её локализации по данным ОФЭКТ/КТ. Гистологически верифицирована аденокарцинома, Глисон 6 (3+3). Брахитерапии с реимплантацией микроисточников ^{125}I произведена 03.10.2020. При контрольном исследовании (декабрь, 2022) уровень ПСА 0,21 нг/мл.

В данном клиническом наблюдении ОФЭКТ/КТ с ^{99m}Tc -HYNIC-PSMA позволила выполнить прицельную биопсию и прецизионную брахитерапию карциномы предстательной железы.

Клинический случай 6

Пациент М., 65 лет, обратился с диагнозом доброкачественной гиперплазии предстательной железы. В связи с повышением уровня ПСА до 4,5 нг/мл выполнена многофокусная биопсия под УЗИ-контролем: гистологически данных за рак не получено; повторная биопсия через 3 месяца также не выявила злокачественной опухоли. Выполнена ОФЭКТ/КТ с ^{99m}Tc -HYNIC-PSMA, выявившая очаг накопления РФЛП в ткани предстательной железы (рис. 7). Под контролем КТ выполнена прицельная биопсия, получено морфологическое подтверждение: «Аденокарцинома, Глисон 7 (4+3)». При планировании брахитерапии источниками низкой мощности дозы на основе изотопа ^{125}I , данные, полученные на аппарате ОФЭКТ/КТ, внесли в систему дозиметрического планирования. С учетом данных о локальном накоплении изотопа в ткани железы 04.10.2020 выполнена фокальная имплантация микроисточников на основе ^{125}I под контролем КТ пара-ректальным доступом. При повторном исследовании (январь, 2023) уровень ПСА 0,11 нг/мл.

Клинический случай 7

Пациенту М., 69 лет, в связи с повышением ПСА до 6,8 нг/мл по месту жительства выполнена многофокусная биопсия предстательной железы. Получено морфологическое подтверждение диагноза из транзитной зоны правой доли: «Аденокарцинома, Глисон 6 (3+3)». В биоптатах из других отделов железы элементов аденокарциномы не получено. С учетом данных МРТ о наличии изменений в этой же зоне проведено планирование имплантации: 30 источников на основе изотопа ^{125}I , объем 32 см³.

Выполнено ОФЭКТ/КТ с ^{99m}Tc -HYNIC-PSMA: выявлено диффузно-очаговое накопление РФЛП под основанием мочевого пузыря. Для повышения точности визуализации очагов в предстательной железе дополнительно выполнена ПЭТ/КТ с ^{68}Ga -PSMA-11. При анализе ПЭТ/КТ выявлены множественные очаги накопления РФЛП в предстательной железе, что свидетельствует о мультифокальности опухоли (рис. 8). Проведена коррекция планирования имплантации с включением всего объема предстательной

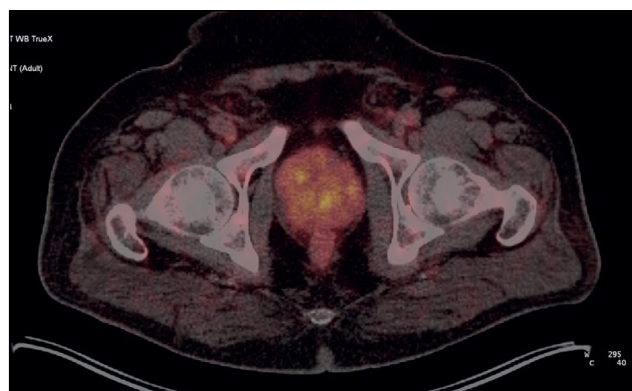


Рис. 8. Пациент М., 69 лет, ПЭТ/КТ с ^{68}Ga -PSMA-11: очаги накопления радиофармпрепарата в предстательной железе, мультифокальность опухоли.

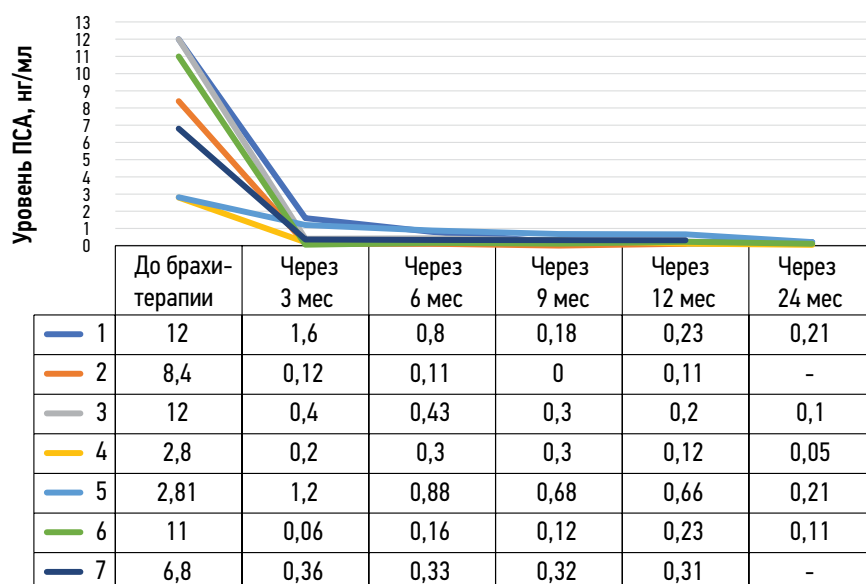


Рис. 9. Динамика уровня простатспецифического антигена у пациентов.

железы (78 см³) — 90 микроисточников на основе изотопа ¹²⁵I (вместо 30 микроисточников по предварительному расчёту).

Имплантация произведена 25.02.2022 в полном объёме предстательной железы. Объём железы, планируемый первоначально для брахитерапии, — 32 см³; объём железы, имплантированной на основе данных ПЭТ/КТ, — 72 см³. В течение года после брахитерапии происходило снижение уровня ПСА до 0,31 нг/мл.

Динамика уровня ПСА у всех вошедших в наш обзор пациентов представлена на рис. 9.

Все пациенты находятся под клиническим наблюдением, проходят регулярные контрольные обследования.

ОБСУЖДЕНИЕ

Биопсия очагов опухоли предстательной железы является обязательной для подтверждения диагноза и выбора стратегии ведения пациента, которые чаще всего выполняются под УЗ- или МР-контролем [14, 15]. Методы радиологической структурной диагностики (УЗИ, КТ, МРТ) не всегда позволяют визуализировать очаги первичной опухоли, поэтому нередко приходится выполнять травматичные мультифокусные биопсии [15]. Ложноотрицательные результаты биопсии достигают 49% случаев, при росте уровня ПСА в крови выполняются повторные биопсии [16]. Повторная биопсия, как правило, проводится не ранее 3 месяцев после первой [16]. Традиционные методы диагностики (УЗИ, КТ, МРТ), особенно мультипараметрическая МРТ, позволяют визуализировать структурную патологию, но не дают возможности отличить доброкачественные очаги от злокачественных, а также оценить границы злокачественной опухоли и её мультифокальность [15–17].

Травматичность и ложноотрицательные результаты традиционной биопсии предстательной железы могут

быть снижены при её выполнении под контролем ПСМА-рецепторной визуализации на ОФЭКТ/КТ и/или ПЭТ/КТ [18–21].

Для карцином предстательной железы низкого и умеренного риска рецидива опухоли (Глисон ≤7) без выхода за пределы капсулы органа, а также в отсутствии данных о наличии метастазов брахитерапия микроисточниками ¹²⁵I является наименее травматичной из всех рекомендуемых методов лечения, обеспечивающей не только высокую эффективность, но и высокое качество жизни [22].

Методы молекулярной визуализации (ОФЭКТ, ПЭТ), совмещённые с кросс-секционными (КТ, МРТ), позволяют дифференцировать очаги злокачественной опухоли предстательной железы, отличающиеся высокой экспрессией рецепторов ПСМА, от доброкачественной структурной патологии. В результате появляется возможность выполнять прицельную биопсию позитивных очагов под УЗ-контролем (с учётом данных молекулярной визуализации), а также прецизионное планирование и брахитерапию под КТ-контролем.

В статье представлен оригинальный клинический опыт, доказывающий осуществимость прецизионной биопсии и брахитерапии локализованного неметастатического рака предстательной железы (стадии pT1-3N0M0) под навигацией ПСМА-рецепторной молекулярной визуализации (ОФЭКТ/КТ с ^{99m}Tc-NYNIC-PSMA и ПЭТ/КТ с ⁶⁸Ga-PSMA-11). Топометрическая разметка и дозиметрическое планирование брахитерапии микроисточниками ¹²⁵I очагов опухоли также осуществлялись на основе вышеобозначенных гибридных методов молекулярной визуализации. В результате топометрическая визуализация очагов карциномы предстательной железы позволила планировать и выполнять брахитерапию прецизионно, минимизируя облучение здоровых тканей и окружающих соседних

органов риска с целью повышения качества жизни пациентов после лечения.

С учётом селективной гиперэкспрессии в опухолевых клетках рака предстательной железы в клинической практике успешно применяется ПСМА-рецепторная молекулярная визуализация с помощью позитронной эмиссионной томографии (ПЭТ). При отсутствии возможности выполнения ПЭТ/КТ с ^{68}Ga -PSMA-11, ^{18}F -DCFPyL (пифлуфолостат F-18) и ^{18}F -PSMA-1007 можно выполнять ОФЭКТ/КТ с $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -HYNIC-PSMA. Специфичность ПСМА-рецепторной визуализации на ПЭТ/КТ и ОФЭКТ/КТ значимо не отличаются, однако чувствительность ПЭТ/КТ существенно выше, поэтому её рекомендуют, например, при отрицательном или сомнительном результате ПСМА-рецепторного ОФЭКТ/КТ [23–25]. Однако ценным преимуществом ОФЭКТ/КТ с $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -HYNIC-PSMA является возможность улучшить молекулярную визуализацию очагов опухоли во второй (отсроченной, через ≥ 15 часов после введения РЛП) фазе [26].

На современном этапе развития персонализированной и прецизионной онкологии роль молекулярной визуализации (ОФЭКТ, ПЭТ), которая, накладываясь на структурную кросс-секционную картину (КТ, МРТ), позволяет обнаружить очаги опухоли на основе их рецепторных особенностей или внутриклеточного метаболизма. Особенно это актуально для повышения прецизионности дистанционной лучевой терапии и, в частности, брахитерапии [27].

У пациентов нашего обзора среднее время выполнения имплантации было сокращено на 1/3 (34,8%), пропорционально уменьшению количества имплантируемых микроисточников. Примерно 15–20 минут из этого времени уходило на укладку пациента на столе томографа после проведения спинальной анестезии, установку и позиционирование стереотаксической приставки к КТ. Длительность этого процесса не зависит от последующего количества имплантируемых источников, а в основном связана с весом пациента и его общим состоянием. В среднем около полутора минут уходит на установку одной иглы, её позиционирование под КТ-контролем, удаление стилетов, «загрузку» источников и удаление самих игл с контрольным сканированием. Необходимо отметить, что сокращение времени имплантации связано также с большей подготовленностью плана имплантации за счёт более точной визуализации зоны поражения и его конфигурации. Таким образом, в большинстве случаев (6 из 7) произошло обоснованное уменьшение количества микроисточников, сокращения времени процедуры, снижение лучевой нагрузки на персонал, занятости КТ-аппарата, а также травмирования и последующего отёка предстательной железы. Ещё в одном случае, по данным ПЭТ/КТ с ^{68}Ga -PSMA-11, наоборот, имелись показания к увеличению количества имплантируемых микроисточников, что было учтено при планировании и выполнении процедуры.

Брахитерапия обладает возможностью создания высоких доз облучения прицельно в очагах опухоли (в среднем 160 Грей) и ассоциирована с минимальным облучением окружающей здоровой ткани предстательной железы, в том числе уретры; не облучает соседние органы риска (мочевой пузырь, прямая кишка).

В результате применения ОФЭКТ/КТ с $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -HYNIC-PSMA и ПЭТ/КТ с ^{68}Ga -PSMA-11 в клинической выборке из 7 пациентов с первичными ($n=5$) и рецидивными ($n=2$) карциномами низкой и умеренной групп риска, локализованными в предстательную железу, при брахитерапии суммарно имплантировано меньше микроисточников ^{125}I (на 36%; 404/282), чем было бы имплантировано при стандартной методике без применения ПСМА-рецепторных гибридных методов молекулярной визуализации. При этом, как сообщалось выше, в 6 наблюдениях молекулярная визуализация опухоли позволила уменьшить число источников, а в одном (мультифокальность опухоли), наоборот, количество микроисточников было увеличено. Необходимо отметить, что речь идёт не о стремлении к «экономии» микроисточников, а о приоритете прецизионности лечебно-диагностического процесса и индивидуализированном повышении эффективности и безопасности лечения.

Во всех клинических наблюдениях получен положительный биохимический ответ с уменьшением уровня ПСА до низких значений с тенденцией к дальнейшему снижению.

АЛГОРИТМ ПСМА-ПРЕЦИЗИОННОЙ БРАХИТЕРАПИИ ЛОКАЛИЗОВАННОГО РАКА ПРЕДСТАТЕЛЬНОЙ ЖЕЛЕЗЫ

Применение гибридных методов молекулярной ПСМА-рецепторной визуализации (ОФЭКТ/КТ и ПЭТ/КТ) в нашем наблюдении позволило:

- персонализировать и повысить прецизионность диагностических (биопсия) и лечебных (брахитерапии) мероприятий у больных раком предстательной железы;
- сократить время, повысить точность и снизить травматичность морфологической верификации первичной опухоли: в 3 случаях из 7 биопсия (ранее неуспешная и травматичная мультифокальная) опухоли была выполнена прицельно из очага накопления $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -HYNIC-PSMA на ОФЭКТ/КТ, и во всех трёх случаях наличие опухоли было подтверждено при гистологическом исследовании;
- уточнить стадию опухоли и исключить наличие регионарных и отдалённых метастазов;
- повысить прецизионность дозиметрии и топометрического расположения микроисточников ^{125}I с целью снижения риска лучевых реакций и повышения качества жизни пациентов;

- повысить точность имплантации микроисточников за счёт опухоли-таргетируемого планирования внутритканевой лучевой терапии очага опухоли, имеющего морфологическое подтверждение;
- осуществлять распределение радиоактивных источников под контролем гибридных методов молекулярной визуализации (ОФЭКТ/КТ, ПЭТ/КТ, ПЭТ/МРТ); утвердить дозиметрический план;
- сократить время ожидания до лечения путём прицельной биопсии очага опухоли с учётом локализации по данным ПСМА-рецепторной гибридной сцинтиграфии (ОФЭКТ/КТ, ПЭТ/КТ);
- оптимизировать количество и топометрический план размещения микроисточников ^{125}I во время брахитерапии (в данной клинической выборке количество микроисточников оказалось на 36%, а время процедуры на 34,8% меньше, в сравнении с традиционным планом лечения).

В результате представленного наблюдения разработан и внедрён в клиническую практику клиники алгоритм ПСМА-прецизионной брахитерапии локализованного рака предстательной железы (рис. 10).

Сильной стороной работы является применение оригинальной инновационной технологии прецизионной брахитерапии под навигацией молекулярной ПСМА-рецепторной визуализации на ОФЭКТ/КТ с $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -HYNIC-PSMA. Период полураспада $^{99\text{m}}\text{Tc}$ составляет 6 часов, что позволяет выполнять отсроченную (на следующий день) ОФЭКТ/КТ зон интереса и более отчётливо видеть очаги накопления

$^{99\text{m}}\text{Tc}$ практически без фона (период полураспада ^{18}F и ^{68}Ga — 110 и 68 минут соответственно). Недостатком нашей работы являются небольшая клиническая выборка (7 пациентов), непродолжительный период наблюдения пациентов (до 2 лет), а также отсутствие пересмотра дисков МРТ (анализировались только заключения, которые во всех случаях были отрицательными в части локализации очагов опухоли) и невозможность оценить и сопоставить диагностическую ценность метода, что будет учтено нами в дизайне дальнейших исследований.

В отечественной и зарубежной литературе сообщений о применении подобной технологии нами не обнаружено. Получен патент на изобретение № 2788859 от 25 января 2023 года «Способ прицельной брахитерапии рака предстательной железы под навигацией гибридной ПСМА-рецепторной сцинтиграфии» [28].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показано, что прецизионность низкодозной брахитерапии микроисточниками на основе изотопа ^{125}I локализованных карцином предстательной железы, равно как и прицельной биопсии, можно повысить с помощью гибридных методов ПСМА-рецепторной молекулярной визуализации (ОФЭКТ/КТ, ПЭТ/КТ). С точки зрения диагностической и терапевтической навигации, методы комплементарны, но ОФЭКТ/КТ более доступна, чем ПЭТ/КТ, и при наличии холодных наборов (HYNIC-PSMA) позволяет выполнять исследование в любой лаборатории

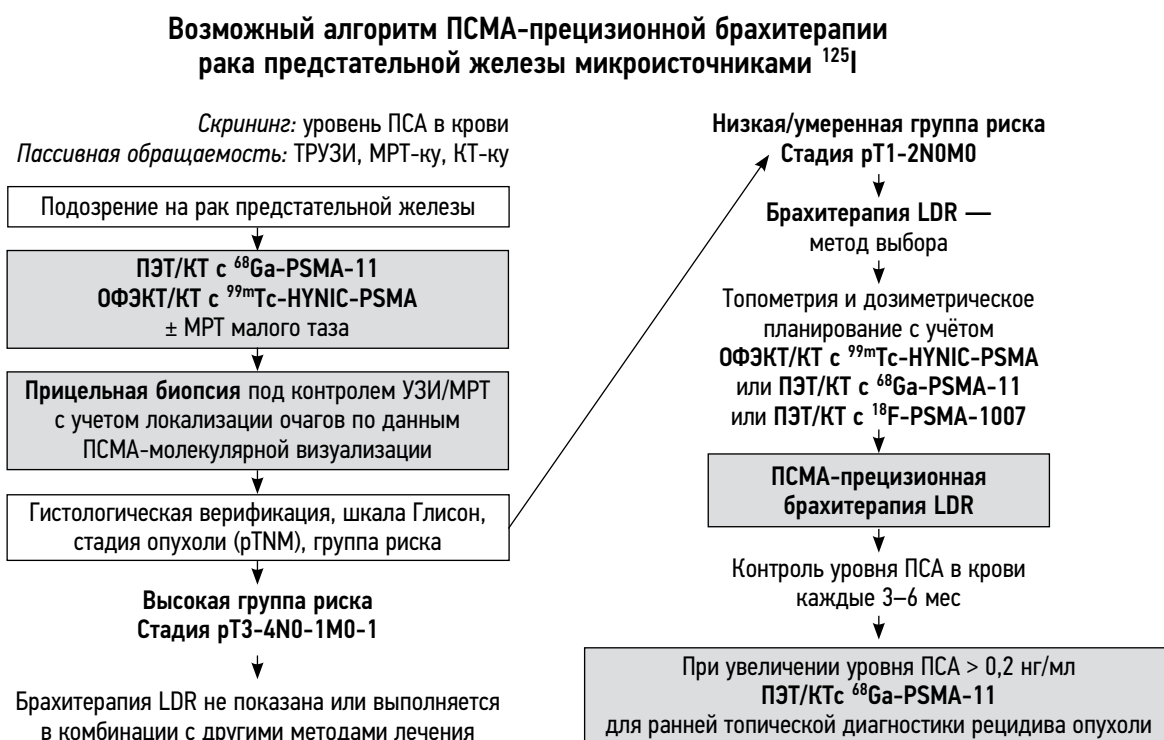


Рис. 10. Алгоритм выбора пациентов на низкодозную брахитерапию с акцентом на повышение прецизионности под навигацией ПСМА-рецепторной молекулярной визуализации. ПСМА — простатспецифический мембранный антиген; ку — контрастное усиление; LDR (low dose-rate) — низкая мощность дозы.

радиоизотопной диагностики, располагающей соответствующим оборудованием.

Инновационная технология ПСМА-прецизионной брахитерапии под контролем гибридной молекулярной визуализации может применяться для первичных и рецидивных случаев локализованного рака предстательной железы, где увеличивает точность и снижает травматичность процедур, повышает медико-экономическую эффективность низкодозной брахитерапии микроисточниками ¹²⁵I.

Необходимы дальнейшие исследования для совершенствования технологии и оценки отдалённых результатов лечения на многочисленной группе пациентов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении работы.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства 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 распределён следующим образом: П.В. Свиридов — ведение пациентов, проведение процедуры брахитерапии, написание текста статьи и подготовки графических материалов; П.О. Румянцев — идея публикации, дизайн, координация и редактирование; М.В. Дегтярев — выполнение и интерпретация ОФЭКТ/КТ и ПЭТ/КТ, написание разделов статьи; С.С. Серженко — выполнение и интерпретация ОФЭКТ/КТ, помощь в редактировании статьи; Д.Б. Санин — дозиметрическое планирование брахитерапии, написание соответствующих разделов статьи; С.В. Стыров — выполнение компьютерной томографии,

написание соответствующих разделов статьи, Д.Ю. Агибалов — обработка результатов исследования, редактирование статьи; С.В. Корнев — помощь в получении информации о результатах обследования после лечения пациентов, помощь в редактировании статьи.

Информированное согласие на публикацию. Авторы получили письменное согласие пациентов на публикацию медицинских данных и фотографий в журнале Digital Diagnostics.

ADDITIONAL INFORMATION

Funding source. This article was not supported by any external sources of funding.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work. P.V. Sviridov — management of patients, brachytherapy procedure conduction, test writing and preparing of images, P.O. Rumiantsev — paper idea, design, coordination, paper writing and edition; M.V. Degtyarev — introduction and interpretation of SPECT/CT and PET/CT, writing of corresponding parts of the paper; S.S. Serzhenko — introduction and interpretation of SPECT/CT, writing of corresponding parts of the paper; D.B. Sanin — dosimetry planning of brachytherapy, writing of corresponding parts of the paper; S.V. Styrov — execution of computed tomography, writing of corresponding parts of the paper; D.Yu. Agibalov — data elaboration, paper edition; S.V. Korenev — assistance in obtaining diagnostic information about treated patients, helping in paper edition.

Consent for publication. Written consent was obtained from all patients for publication of relevant medical information and all of accompanying images within the manuscript in Digital Diagnostics Journal.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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, N 3. P. 209–249. doi: 10.3322/caac.21660
2. Nyame Y.A., Gulati R., Tsodikov A., et al. Prostate-Specific antigen screening and recent increases in advanced prostate cancer // *JNCI Cancer Spectr.* 2021. Vol. 5, N 1. P. pkaa. 098 doi: 10.1093/jncics/pkaa098
3. Pommier P., Ferré M., Blanchard P., et al. Prostate cancer brachytherapy: SFRO guidelines 2021 // *Cancer Radiotherap.* 2022. Vol. 26, N 1-2. P. 344–355. doi: 10.1016/j.canrad.2021.11.019
4. Parker C., Castro E., Fizazi K., et al. Prostate cancer: ESMO Clinical Practice Guidelines for diagnosis, treatment and follow-up // *Ann Oncol.* 2020. Vol. 31, N 9. P. 1119–1134. doi: 10.1016/j.annonc.2020.06.011
5. Mottet N., van der Berg R., Briers E., et al. EAU-eanm-estro-esuriog guidelines on prostate cancer-2020 update. Part 1: Screening,

diagnosis, and local treatment with curative intent // *Eur Urol.* 2021. Vol. 79, N 2. P. 243–262. doi: 10.1016/j.eururo.2020.09.042

6. Носов Д.А., Волкова М.И., Гладков О.А., и др. Практические рекомендации по лечению рака предстательной железы // *Злокачественные опухоли. Практические рекомендации RUSSCO.* 2022. Т. 12, № #3s2. С. 607–626. doi: 10.18027/2224-5057-2022-12-3s2-607-626

7. Tsumura H., Tanaka N., Oguchi T., et al. Comparative effectiveness of low-dose-rate brachytherapy with or without external beam radiotherapy in favorable and unfavorable intermediate-risk prostate cancer // *Sci Rep.* 2022. Vol. 12, N 1. P. 11023. doi: 10.1038/s41598-022-15028-6

8. Tanaka N., Asakawa I., Hasegawa M., Fujimoto K. Low-dose-rate brachytherapy for prostate cancer: A 15-year experience in Japan // *Int J Urol.* 2020. Vol. 27, N 1. P. 17–23. doi: 10.1111/iju.14098

9. Fellin G., Mirri M.A., Santoro L., et al. Low dose rate brachytherapy (LDR-BT) as monotherapy for early stage prostate cancer in Italy:

- Practice and outcome analysis in a series of 2237 patients from 11 institutions // *Br J Radiol*. 2016. Vol. 89, N 1065. P. 20150981. doi: 10.1259/bjr.20150981
10. Okamoto K., Okuyama K., Kohno N., Tsugawa T. Clinical outcomes of low-dose-rate brachytherapy based radiotherapy for intermediate risk prostate cancer // *J Contemp Brachytherapy*. 2020. Vol. 12, N 1. P. 6–11. doi: 10.5114/jcb.2020.92405
11. Cunha J.A., Flynn R., Bélanger C., et al. Brachytherapy future directions // *Semin Radiat Oncol*. 2020. Vol. 30, N 1. P. 94–106. doi: 10.1016/j.semradonc.2019.09.001
12. Afshar-Oromieh A. PSMA-ligand imaging in the diagnosis of prostate cancer // *Clinical Nuclear Medicine: Second Edition*. Springer International Publishing, 2020. P. 755–763. doi: 10.1007/978-3-030-39457-8_25
13. Zippel C., Ronski S.C., Bohnet-Joschko S., et al. Current status of PSMA-radiotracers for prostate cancer: Data analysis of prospective trials listed on clinicaltrials.gov // *Pharmaceuticals*. 2020. Vol. 13, N 1. P. 12. doi: 10.3390/ph13010012
14. Зырянов А.В., Ощепков В.Н., Свиридов П.В., и др. Рекомендации по лечению рака предстательной железы с помощью низкодозной перманентной внутритканевой лучевой терапии (брахитерапии). Экспертное совещание Объединения брахитерапевтов России (ОБР), 4 октября 2014, Москва // *Экспериментальная и клиническая урология*. 2015. № 2. С. 37–46.
15. Kasivisvanathan V., Rannikko A.S., Borghi M., et al. MRI-Targeted or standard biopsy for prostate-cancer diagnosis // *N Engl J Med*. 2018. Vol. 378, N 19. P. 1767–1777. doi: 10.1056/nejmoa1801993
16. Sazuka T., Imamoto T., Namekawa T., et al. Analysis of preoperative detection for apex prostate cancer by transrectal biopsy // *Prostate Cancer*. 2013. Vol. 2013. P. 705865. doi: 10.1155/2013/705865
17. Tewes S., Peters I., Tiemeyer A., et al. Evaluation of MRI/Ultrasound fusion-guided prostate biopsy using transrectal and transperineal approaches // *Biomed Res Int*. 2017. Vol. 2017. P. 2176471. doi: 10.1155/2017/2176471
18. Qiu D.X., Li J., Zhang J.W., et al. Dual-tracer PET/CT-targeted, mpMRI-targeted, systematic biopsy, and combined biopsy for the diagnosis of prostate cancer: A pilot study // *Eur J Nucl Med Mol Imaging*. 2022. Vol. 49, N 8. P. 2821–2832. doi: 10.1007/s00259-021-05636-1
19. Donato P., Morton A., Yaxley J., et al. 68Ga-PSMA PET/CT better characterizes localised prostate cancer after MRI and transperineal prostate biopsy: Is 68Ga-PSMA PET/CT guided biopsy the future? // *Eur J Nucl Med Mol Imaging*. 2020. Vol. 47, N 8. P. 1843–1851. doi: 10.1007/s00259-019-04620-0
20. Zhang L.L., Li W.C., Xu Z., et al. 68Ga-PSMA PET/CT targeted biopsy for the diagnosis of clinically significant prostate cancer compared with transrectal ultrasound guided biopsy: A prospective randomized single-centre study // *Eur J Nucl Med Mol Imaging*. 2021. Vol. 48, N 2. P. 483–492. doi: 10.1007/s00259-020-04863-2
21. Duan H., Ghanouni P., Daniel B., et al. A pilot study of 68Ga-PSMA11 and 68Ga-RM2 PET/MRI for biopsy guidance in patients with suspected prostate cancer // *J Med*. 2022. Vol. 64, N 5. P. 744–750. doi: 10.2967/jnumed.122.264448
22. Chin J., Rumble R.B., Kollmeier M., et al. Brachytherapy for patients with prostate cancer: American Society of Clinical Oncology / Cancer Care Ontario joint guideline update // *J Clin Oncol*. 2017. Vol. 35, N 15. P. 1737–1745. doi: 10.1200/JCO.2016.72.0466
23. Basu S., Alavi A. SPECT-CT and PET-CT in oncology: An overview // *Curr Med Imaging Rev*. 2011. Vol. 7, N 3. P. 202–209. doi: 10.2174/157340511796411168
24. Soldatov A., von Klot C.A., Walacides D., et al. Patterns of progression after 68Ga-PSMA-ligand PET/CT-guided radiation therapy for recurrent prostate cancer // *Int J Radiat Oncol Biol Phys*. 2019. Vol. 103, N 1. P. 95–104. doi: 10.1016/j.ijrobp.2018.08.066
25. Werner P., Neumann C., Eiber M., et al. [99mTc]Tc-PSMA-I&S-SPECT/CT: experience in prostate cancer imaging in an outpatient center // *EJNMMI Res*. 2020. Vol. 10, N 1. P. 45. doi: 10.1186/s13550-020-00635-z
26. Berliner C., Steinhilber L., Chantadisai M., et al. Delayed imaging improves lesion detectability in [99mTc]Tc-PSMA-I&S SPECT/CT in recurrent prostate cancer // *J Nucl Med*. 2023. Vol. 64, N 7. P. 1036–1042. doi: 10.2967/jnumed.122.265252
27. Румянцев П.О. Возрастающая роль методов функциональной визуализации для навигации дистанционной радиотерапии и брахитерапии на примере рака предстательной железы // *Digital Diagnostics*. 2022. Т. 2, № 4. С. 488–497. doi: 10.17816/DD96197
28. Патент РФ на изобретение № RU 2788859 С2. Агибалов Д.Ю., Дегтярев М.В., Румянцев П.О., и др. Способ прицельной брахитерапии рака предстательной железы под навигацией гибридной ПСМА-рецепторной сцинтиграфии. Режим доступа: https://yandex.ru/patents/doc/RU2788859C2_20230125. Дата обращения: 15.08.2023.

REFERENCES

1. Sung H, Ferlay J, Siegel RL, et al. Global cancer statistics 2020: Globocan estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA Cancer J Clin*. 2021;71(3):209–249. doi: 10.3322/caac.21660
2. Nyame YA, Gulati R, Tsodikov A, et al. Prostate-Specific antigen screening and recent increases in advanced prostate cancer. *JNCI Cancer Spectr*. 2021;5(1):pkaa098. doi: 10.1093/jncics/pkaa098
3. Pommier P, Ferré M, Blanchard P, et al. Prostate cancer brachytherapy: SFRO guidelines 2021. *Cancer Radiotherap*. 2022;26(1-2):344–355. doi: 10.1016/j.canrad.2021.11.019
4. Parker C, Castro E, Fizazi K, et al. Prostate cancer: ESMO clinical practice guidelines for diagnosis, treatment and follow-up. *Ann Oncol*. 2020;31(9):1119–1134. doi: 10.1016/j.annonc.2020.06.011
5. Mottet N, van der Berg R, Briers E, et al. EAU-eanm-estro-esuriog guidelines on prostate cancer-2020 update. Part 1: Screening, diagnosis, and local treatment with curative intent. *Eur Urol*. 2021;79(2):243–262. doi: 10.1016/j.eururo.2020.09.042
6. Nosov DA, Volkova MI, Gladkov OA, et al. Practical recommendations for the treatment of prostate cancer. *Malignant Tumors. Practical recommendations RUSSCO*. 2022;12(#3s2):607–626. (In Russ). doi: 10.18027/2224-5057-2022-12-3s2-607-626
7. Tsumura H, Tanaka N, Oguchi T, et al. Comparative effectiveness of low-dose-rate brachytherapy with or without external beam radiotherapy in favorable and unfavorable intermediate-risk prostate cancer. *Sci Rep*. 2022;12(1):11023. doi: 10.1038/s41598-022-15028-6
8. Tanaka N, Asakawa I, Hasegawa M, Fujimoto K. Low-dose-rate brachytherapy for prostate cancer: A 15-year experience in Japan. *Int J Urol*. 2020;27(1):17–23. doi: 10.1111/iju.14098
9. Fellin G, Mirri MA, Santoro L, et al. Low dose rate brachytherapy (LDR-BT) as monotherapy for early stage prostate cancer in

Italy: Practice and outcome analysis in a series of 2237 patients from 11 institutions. *Br J Radiol.* 2016;89(1065):20150981. doi: 10.1259/bjr.20150981

10. Okamoto K, Okuyama K, Kohno N, Tsugawa T. Clinical outcomes of low-dose-rate brachytherapy based radiotherapy for intermediate risk prostate cancer. *J Contemp Brachytherapy.* 2020;12(1):6–11. doi: 10.5114/jcb.2020.92405

11. Cunha JA, Flynn R, Bélanger C, et al. Brachytherapy future directions. *Semin Radiat Oncol.* 2020;30(1):94–106. doi: 10.1016/j.semradonc.2019.09.001

12. Afshar-Oromieh A. PSMA-ligand imaging in the diagnosis of prostate cancer. In: *Clinical Nuclear Medicine: Second Edition.* Springer International Publishing; 2020. P. 755–763. doi: 10.1007/978-3-030-39457-8_25

13. Zippel C, Ronski SC, Bohnet-Joschko S, et al. Current status of PSMA-radiotracers for prostate cancer: Data analysis of prospective trials listed on clinicaltrials.gov. *Pharmaceuticals.* 2020;13(1):12. doi: 10.3390/ph13010012

14. Zyryanov AV, Oshchepkov VN, Sviridov PV, et al. Recommendations for the treatment of prostate cancer with low-dose permanent interstitial radiation therapy (brachytherapy). Expert meeting of the Association of Brachytherapists of Russia (OBR), October 4, 2014, Moscow. *Experimental Clin Urol.* 2015;(2):37–46. (In Russ).

15. Kasivisvanathan V, Rannikko AS, Borghi M, et al. MRI-targeted or standard biopsy for prostate-cancer diagnosis. *N Engl J Med.* 2018;378(19):1767–1777 doi: 10.1056/nejmoa1801993

16. Sazuka T, Imamoto T, Namekawa T, et al. Analysis of preoperative detection for apex prostate cancer by transrectal biopsy. *Prostate Cancer.* 2013;2013:705865. doi: 10.1155/2013/705865

17. Tewes S, Peters I, Tiemeyer A, et al. Evaluation of MRI/Ultrasound fusion-guided prostate biopsy using transrectal and transperineal approaches. *Biomed Res Int.* 2017;2017:2176471. doi: 10.1155/2017/2176471

18. Qiu DX, Li J, Zhang JW, et al. Dual-tracer PET/CT-targeted, mpMRI-targeted, systematic biopsy, and combined biopsy for the diagnosis of prostate cancer: A pilot study. *Eur J Nucl Med Mol Imaging.* 2022;49(8):2821–2832. doi: 10.1007/s00259-021-05636-1

19. Donato P, Morton A, Yaxley J, et al. 68Ga-PSMA PET/CT better characterizes localised prostate cancer after MRI and

transperineal prostate biopsy: Is 68Ga-PSMA PET/CT guided biopsy the future? *Eur J Nucl Med Mol Imaging.* 2020;47(8):1843–1851. doi: 10.1007/s00259-019-04620-0

20. Zhang LL, Li WC, Xu Z, et al. 68Ga-PSMA PET/CT targeted biopsy for the diagnosis of clinically significant prostate cancer compared with transrectal ultrasound guided biopsy: A prospective randomized single-centre study. *Eur J Nucl Med Mol Imaging.* 2021;48(2):483–492. doi: 10.1007/s00259-020-04863-2

21. Duan H, Ghanouni P, Daniel B, et al. A pilot study of 68Ga-PSMA11 and 68Ga-RM2 PET/MRI for biopsy guidance in patients with suspected prostate cancer. *J Nuclear Med.* 2022;64(5):744–750. doi: 10.2967/jnumed.122.264448

22. Chin J, Rumble RB, Kollmeier M, et al. Brachytherapy for patients with prostate cancer: American Society of Clinical Oncology / Cancer Care Ontario joint guideline update. *J Clin Oncol.* 2017;35(15):1737–1745. doi: 10.1200/JCO.2016.72.0466

23. Basu S, Alavi A. SPECT-CT and PET-CT in oncology: An overview. *Curr Med Imaging Rev.* 2011;7(3):202–209. doi: 10.2174/157340511796411168

24. Soldatov A, von Klot CA, Walacides D, et al. Patterns of progression after 68Ga-PSMA-Ligand PET/CT-Guided radiation therapy for recurrent prostate cancer. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 2019;103(1):95–104. doi: 10.1016/j.ijrobp.2018.08.066

25. Werner P, Neumann C, Eiber M, et al. [99mTc]Tc-PSMA-I&S-SPECT/CT: experience in prostate cancer imaging in an outpatient center. *EJNMMI Res.* 2020;10(1):45. doi: 10.1186/s13550-020-00635-z

26. Berliner C, Steinhilber L, Chantadisai M, et al. Delayed imaging improves lesion detectability in [99mTc]Tc-PSMA-I&S SPECT/CT in recurrent prostate cancer. *J Nucl Med.* 2023;64(7):1036–1042. doi: 10.2967/jnumed.122.265252

27. Rumyantsev PO. The increasing role of functional imaging methods for navigation of remote radiotherapy and brachytherapy on the example of prostate cancer. *Digital Diagnostics.* 2022;2(4):488–497. (In Russ). doi: 10.17816/DD96197

28. Patent RUS № RU 2788859 C2. Agibalov DYU, Degtyarev MV, Rumyantsev PO, et al. Method of targeted brachytherapy of prostate cancer under the navigation of hybrid PSMA-receptor scintigraphy. Available from: https://yandex.ru/patents/doc/RU2788859C2_20230125. Accessed: 15.08.2023.

ОБ АВТОРАХ

* **Румянцев Павел Олегович**, д-р мед. наук;
адрес: Россия, 191186, Санкт-Петербург,
ул. Малая Конюшенная, д. 8;
ORCID: 0000-0002-7721-634X;
eLibrary SPIN: 7085-7976;
e-mail: pavelrum@gmail.com

Свиридов Павел Владимирович;
ORCID: 0009-0008-3362-8255;
eLibrary SPIN: 4702-3067;
e-mail: p_sviridov73@mail.ru

AUTHORS' INFO

* **Pavel O. Rumiantsev**, MD, Dr. Sci. (Med.);
address: 8 Malaya Konyushennaya street, 191186 Saints
Peterburg, Russia;
ORCID: 0000-0002-7721-634X;
eLibrary SPIN: 7085-7976;
e-mail: pavelrum@gmail.com

Pavel V. Sviridov;
ORCID: 0009-0008-3362-8255;
eLibrary SPIN: 4702-3067;
e-mail: p_sviridov73@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Дегтярев Михаил Владимирович;

ORCID: 0000-0001-5652-2607;

eLibrary SPIN: 7725-7831;

e-mail: germed@mail.ru

Серженко Сергей Сергеевич;

ORCID: 0000-0003-2326-1396;

eLibrary SPIN: 4713-8986;

e-mail: vv1ld@yandex.ru

Санин Дмитрий Борисович, канд. биол. наук;

ORCID: 0009-0004-2047-4921;

eLibrary SPIN: 8939-9101;

e-mail: dimitresko82@yandex.ru

Стыров Сергей Викторович;

ORCID: 0000-0003-4315-8855;

eLibrary SPIN: 9019-8520;

e-mail: rizost@yandex.ru

Агibalов Дмитрий Юрьевич;

ORCID: 0000-0003-2995-7140;

eLibrary SPIN: 6938-5804;

e-mail: agibalovd@bk.ru

Коренев Сергей Владимирович, д-р мед. наук, профессор;

ORCID: 0000-0003-2310-0576;

eLibrary SPIN: 5257-4476;

e-mail: korenevsv@mail.ru

Mikhail V. Degtyarev;

ORCID: 0000-0001-5652-2607;

eLibrary SPIN: 7725-7831 ;

e-mail: germed@mail.ru

Sergei S. Serzhenko;

ORCID: 0000-0003-2326-1396;

eLibrary SPIN: 4713-8986;

e-mail: vv1ld@yandex.ru

Dmitry B. Sanin, Cand. Sci. (Biol.);

ORCID: 0009-0004-2047-4921;

eLibrary SPIN: 8939-9101;

e-mail: dimitresko82@yandex.ru

Sergey V. Styrov;

ORCID: 0000-0003-4315-8855;

eLibrary SPIN: 9019-8520;

e-mail: rizost@yandex.ru

Dmitry Yu. Agibalov;

ORCID: 0000-0003-2995-7140;

eLibrary SPIN: 6938-5804;

e-mail: agibalovd@bk.ru

Sergey V. Korenev, MD, Dr. Sci. (Med.), Professor;

ORCID: 0000-0003-2310-0576;

eLibrary SPIN: 5257-4476;

e-mail: korenevsv@mail.ru

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD321670>

Опыт применения мобильного компьютерного томографа в резервном госпитале для лечения пациентов с новой коронавирусной инфекцией COVID-19

Н.Д. Кудрявцев¹, А.В. Петрайкин¹, Е.С. Ахмад¹, Ф.А. Киселев¹, В.В. Бурашов¹,
А.Н. Мухортова¹, И.В. Солдатов¹, А.С. Шкода²

¹ Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий, Москва, Российская Федерация;

² Городская клиническая больница № 67 имени Л.А. Ворохобова, Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Пандемия новой коронавирусной инфекции COVID-19 бросила вызов системам здравоохранения практически всех стран мира. От организаторов здравоохранения требовалось принятие оперативных и эффективных решений для обеспечения высокого качества оказания медицинской помощи в новых условиях. Потребность в формировании резервного коечного фонда при пандемии была обусловлена высокой нагрузкой на городские больницы в Москве, в связи с чем в непрофильных сооружениях (ледовые арены, торговые центры, выставочные павильоны) были организованы временные резервные госпитали для лечения пациентов с COVID-19. Это потребовало поиска решений для обеспечения необходимого уровня диагностики и лечения, соответствующего профилю медицинского учреждения. С учётом технических и временных ограничений, связанных с установкой стационарного компьютерного томографа, одним из решений была установка мобильного компьютерного томографа.

Целью работы было поделиться опытом использования мобильного компьютерного томографа в условиях временного резервного госпиталя для лечения пациентов с коронавирусной инфекцией COVID-19. В работе представлена информация о характеристиках мобильного компьютерного томографа; отмечены его преимущества и недостатки; представлен вариант планировки аппаратной, пультовой комнат и вариант размещения томографа; представлены результаты дозиметрических исследований; дана клиническая оценка применимости подобного типа диагностических устройств.

Ключевые слова: мобильный компьютерный томограф; пандемия коронавирусной инфекции; COVID-19; отделение лучевой диагностики.

Как цитировать:

Кудрявцев Н.Д., Петрайкин А.В., Ахмад Е.С., Киселев Ф.А., Бурашов В.В., Мухортова А.Н., Солдатов И.В., Шкода А.С. Опыт применения мобильного компьютерного томографа в резервном госпитале для лечения пациентов с новой коронавирусной инфекцией COVID-19 // *Digital Diagnostics*. 2023. Т. 4, № 3. С. 427–438. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD321670>

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD321670>

Using a mobile computer tomography scanner in a field hospital setting to manage patients with COVID-19

Nikita D. Kudryavtsev¹, Alexey V. Petraikin¹, Ekaterina S. Akhmad¹, Fyodor A. Kiselev¹, Vyacheslav V. Burashov¹, Anna N. Mukhortova¹, Ilya V. Soldatov¹, Andrey S. Shkoda²

¹ Moscow Center for Diagnostics and Telemedicine, Moscow, Russian Federation;

² City Clinical Hospital No. 67 named after L.A. Vorokhobov, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

The global outbreak of COVID-19 has posed unprecedented challenges to healthcare systems worldwide. Healthcare administrators had to make quick and effective decisions to ensure high quality of medical care standards in new conditions. The need to form a reserve bed fund during the pandemic was due to the high load on city hospitals in Moscow. Due to this fact, temporary reserved hospitals for COVID-19 patients were organized in non-core facilities, such as ice arenas, shopping malls, and exhibition pavilions. This urgency prompted a search for solutions that could provide the necessary level of diagnosis and treatment appropriate to specialized medical facility. Given the technical and time constraints associated with the installation of a fixed computer tomographic scanner, the deployment of mobile computer tomographic scanners emerged as a viable option. The study aims to share insights gained from using a mobile computer tomographic scanner within a temporary backup hospital setting to treating patients with COVID-19 coronavirus infection. The paper discusses the features, advantages, and disadvantages of mobile computer tomography. It also presents hardware and control room layouts, along with the placement options for the computer tomography device. The research includes the results of dosimetry studies and provides a clinical assessment of the applicability of this type of diagnostic devices.

Keywords: computer tomographic scanner; COVID-19 pandemics; radiology departments.

To cite this article:

Kudryavtsev ND, Petraikin AV, Akhmad ES, Kiselev FA, Burashov VV, Mukhortova AN, Soldatov IV, Shkoda AS. Using a mobile computer tomography scanner in a field hospital setting to manage patients with COVID-19. *Digital Diagnostics*. 2023;4(3):427–438. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD321670>

Received: 11.04.2023

Accepted: 17.04.2023

Published: 25.05.2023

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD321670>

在备用医院使用移动式电脑断层扫描仪治疗新型冠状病毒感染（COVID-19）患者的经验

Nikita D. Kudryavtsev¹, Alexey V. Petraikin¹, Ekaterina S. Akhmad¹, Fyodor A. Kiselev¹, Vyacheslav V. Burashov¹, Anna N. Mukhortova¹, Ilya V. Soldatov¹, Andrey S. Shkoda²

¹ Moscow Center for Diagnostics and Telemedicine, Moscow, Russian Federation

² City Clinical Hospital No. 67 named after L.A. Vorokhobov, Moscow, Russian Federation

简评

新型冠状病毒感染（COVID-19）的大流行给世界上几乎所有国家的卫生系统带来了挑战。医疗保健组织者需要做出迅速有效的决定，以确保在新的条件下提供高质量的医疗保健服务。在大流行期间，由于莫斯科的城市医院负担格外沉重，因此需要建立一个备用床基金，并在非核心建筑物（冰上运动场、购物中心、展览馆）中建立临时备用医院，以治疗COVID-19患者。这就需要寻找解决方案，以在专业医疗机构中提供必要水平的诊断和治疗。考虑到安装固定式电脑断层扫描仪的技术和时间限制，解决方案之一是安装移动式电脑断层扫描仪。本文旨在分享在临时备用医院使用移动式电脑断层扫描仪治疗冠状病毒感染COVID-19病人的经验。该文章介绍移动式电脑断层扫描仪的特性；指出其优缺点；介绍设备室、控制室的布局变式和电脑断层扫描仪的摆放变式；介绍剂量测定研究的结果；对此类诊断设备的适用性进行了临床评估。

关键词：移动式电脑断层扫描仪；冠状病毒大流行；COVID-19；放射诊断科。

引用本文：

Kudryavtsev ND, Petraikin AV, Akhmad ES, Kiselev FA, Burashov VV, Mukhortova AN, Soldatov IV, Shkoda AS. 在备用医院使用移动式电脑断层扫描仪治疗新型冠状病毒感染（COVID-19）患者的经验. *Digital Diagnostics*. 2023;4(3):427–438. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD321670>

收到: 11.04.2023

接受: 17.04.2023

发布日期: 25.05.2023

ВВЕДЕНИЕ

Потребность в формировании резервного коечного фонда при пандемии коронавирусной инфекции COVID-19 обусловлена высокой нагрузкой на городские больницы в Москве. В этой связи в непрофильных сооружениях — на ледовых аренах, в торговых центрах и выставочных павильонах — были организованы временные резервные госпитали для лечения пациентов с COVID-19, что потребовало поиска решений по обеспечению необходимого уровня диагностики и лечения, соответствующего профильному медицинскому учреждению [1]. Один из резервных госпиталей был организован на базе ледового комплекса «Крылатское» (ГБУЗ ГКБ № 67 им. Л.А. Ворохобова ДЗМ); рис. 1.

Методы лучевой диагностики, в частности компьютерная томография, рекомендованы для выявления признаков вирусной пневмонии, вызванной COVID-19, и дифференциальной диагностики с другими заболеваниями лёгких, а также для определения степени выраженности, динамики изменений и оценки эффективности проводимой терапии [2–4]. С учётом технических и временных ограничений, связанных с установкой стационарного компьютерного томографа, одним из решений была установка мобильного компьютерного томографа (КТ) Airo TruCT (Stryker, США).

Цель данной работы — оценить эффективность применения мобильного КТ в условиях временного резервного госпиталя для лечения пациентов с коронавирусной инфекцией COVID-19.

МОБИЛЬНЫЙ КОМПЬЮТЕРНЫЙ ТОМОГРАФ: ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ВРЕМЕННОГО РЕЗЕРВНОГО ГОСПИТАЛЯ ДЛЯ ЛЕЧЕНИЯ ПАЦИЕНТОВ С COVID-19

Общие характеристики мобильного компьютерного томографа

Мобильный КТ Airo TruCT предназначен для применения в нейрохирургических операционных, однако производитель не исключает его использования в целях диагностики ургентной патологии других анатомических областей¹. Мобильный КТ Airo TruCT имеет компактный размер (рис. 2), что упрощает его монтаж и транспортировку. КТ-система состоит из передвижного основания, на которое установлена гентри с диаметром апертуры 107 см и 32 рядами детекторов шириной 1 мм. Управление КТ осуществляется через проводную консоль

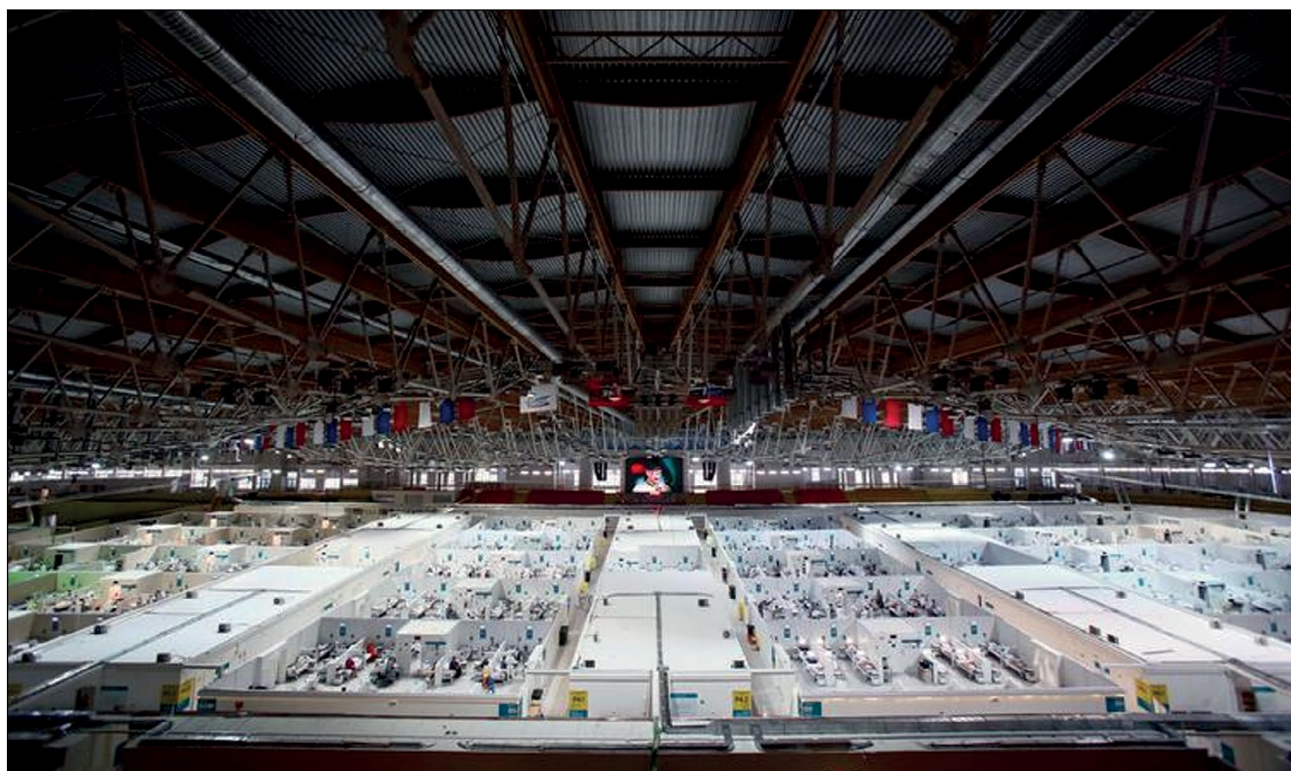


Рис. 1. Резервный временный госпиталь для лечения пациентов с COVID-19, развёрнутый в ледовом комплексе «Крылатское» в Москве. Фотография Reuters (<https://pictures.reuters.com/>).

¹ Stryker.com [интернет]. Neurosurgery (<https://www.stryker.com/us/en/spine/products/airo-truact/imaging/clinical/neurosurgery.html>); Airo Truact Mobile Imaging System (<https://www.stryker.com/us/en/spine/products/airo-truact/imaging.html>).



Рис. 2. Мобильный компьютерный томограф, подготовленный к проведению исследования.



Рис. 3. Консоль управления мобильным компьютерным томографом Airo TruCT.

с длиной провода 5 м (рис. 3). Мобильный КТ не требователен к параметрам источника питания и подключается в электрическую сеть мощностью 1,5 кВт, однако система блока питания позволяет проводить сканирование с параметрами 120 kV и 250 mA, что соответствует мощности 30 кВт.

Размещение и дозиметрия

Кабинет КТ прошёл техническую паспортизацию совместно с техническими испытаниями оборудования (контроль эксплуатационных параметров) и радиационным контролем на рабочих местах и смежных с процедурной помещениях по действующим актуальным нормативным актам и методикам испытаний (измерений).

Процедурная КТ-кабинета располагается в приёмном отделении на первом этаже ледового комплекса «Крылатское» (рис. 4). Большой поток пациентов и нестандартное

(off label) применение данного оборудования потребовало ряда технических решений:

- 1) для обеспечения радиационной безопасности рентгенолаборантов консоль управления КТ была выведена в комнату управления;
- 2) из-за отсутствия в комнате управления смотрового окна была установлена видеосистема, позволяющая контролировать состояние пациента и ход выполнения исследования;
- 3) в связи с отсутствием встроенных звуковых команд для задержки дыхания связь с пациентом во время исследования была организована посредством портативных радиостанций Baofeng.

Расчёт защиты от ионизирующего излучения в смежных помещениях выполнен в соответствии с российскими требованиями к устройству и эксплуатации рентгеновских кабинетов с учётом особенностей функционирования КТ

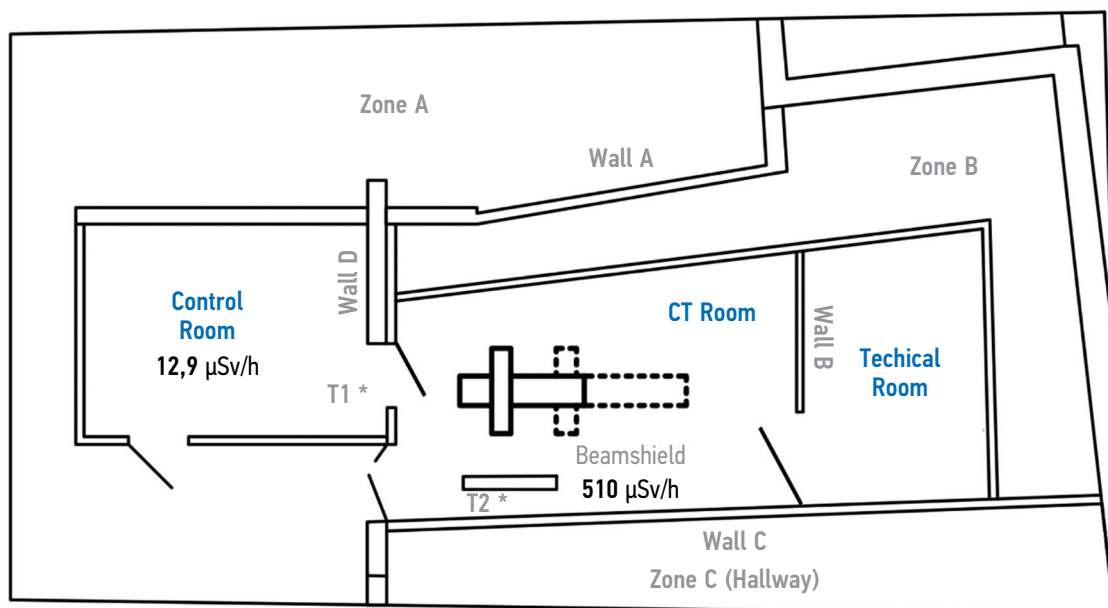


Рис. 4. Схема проекта организации компьютерно-томографической процедурной, комнаты управления и кабинета врача-рентгенолога: помещение А (Zone А) — пространство павильона; помещение Б (Zone В) — техническая зона; помещение В (Zone С) — коридор (помещения А, Б, В — зоны без постоянного пребывания персонала).

Airo TruCT (во время сканирования происходит перемещение гентри томографа, при этом стол с пациентом находится в неподвижном состоянии). В качестве защиты в стационарных ограждающих конструкциях помещения используются листы рентгенозащитного гипсокартона фирмы Knauf (Iphofen, Германия).

Дозиметрический контроль на рабочих местах, в смежных помещениях и на прилегающих территориях показал, что величины мощностей доз в измеряемых точках не превышают допустимых в действующих нормативных документах (см. рис. 4).

Технический контроль качества эксплуатационных параметров

Проведена стандартная оценка эксплуатационных параметров КТ-системы согласно действующим руководствам². Оценивались общие механические характеристики оборудования; суммарная фильтрация; слой половинного ослабления; величина пульсации анодного напряжения; анодное напряжение; время экспозиции; линейность дозы излучения; повторяемость дозы излучения; параметры качества томографического изображения.

По результатам проведенных испытаний КТ-система соответствует эксплуатационным характеристикам и требованиям стандартов.

Клиническое применение

Во временный резервный госпиталь направлялись пациенты с лёгкой и средней степенью тяжести течения

COVID-19 [2] с соответствующим объёмом поражения паренхимы лёгких КТ-1 и КТ-2, требующие стационарного лечения и наблюдения. Всем пациентам, поступившим в приёмное отделение, проводилось КТ-исследование органов грудной клетки; исключением являлось наличие результатов недавно выполненного КТ-исследования (не более 4 дней). При выполнении КТ распределение пациентов по степени тяжести для случайной выборки из 500 пациентов составляло 155 (31,0%), 202 (40,4%), 109 (21,8%) и 34 (6,8%) для КТ-1, КТ-2, КТ-3 и КТ-4 соответственно. КТ-исследования с контрастным усилением не были предусмотрены ввиду значительных энергетических затрат и возможного перегрева рентгеновской трубки при мультифазном сканировании; ограничением для данной методики была и относительная длительность сканирования.

При наличии клинических показаний проводились КТ-исследования головного мозга и головы, органов брюшной полости и забрюшинного пространства, органов малого таза, позвоночника и конечностей (параметры сканирования приведены в табл. 1).

Несомненным преимуществом оказалась широкая (107 см) апертура гентри.

Органы грудной клетки. Большая часть КТ-исследований проведена с целью диагностики или динамического наблюдения вирусной пневмонии COVID-19. Указанные в табл. 1 параметры сканирования позволили получить изображения достаточного качества для дифференциальной диагностики между вирусной пневмонией,

Таблица 1. Стандартизированные протоколы сканирования для разных анатомических областей

Анатомическая область	Органы грудной клетки	Головной мозг	Органы брюшной полости
Параметр			
Направление сканирования	Краниокаудальное	Краниокаудальное	Краниокаудальное
Тип сканирования	Спиральное	Спиральное	Спиральное
Электрическое напряжение, кВ	120	120	120
Сила электрического тока, мА	38	155	69
Толщина среза, мм	1,0	1,0	1,0
Питч-фактор	1,415	1,415	1,415
Время оборота рентгеновской трубки, сек	1,92	1,92	1,92
Матрица реконструкции, рх	512×512	512×512	512×512
Длительность сканирования, сек	12	8	16
Поглощённая доза излучения (DLP), мГр*см	230,7	1186,8	564
Протяжённость сканирования, см	30	20	40

² Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов АО «Кодекс» [интернет]. ГОСТ Р МЭК 61223-2-6-2001 Оценка и контроль эксплуатационных параметров рентгеновской аппаратуры в отделениях (кабинетах) рентгенодиагностики. Часть 2–6. Испытания на постоянство параметров. Аппараты для рентгеновской компьютерной томографии (<https://docs.cntd.ru/document/1200029048>); ГОСТ Р 51746-2001 Оценка и контроль эксплуатационных параметров рентгеновской аппаратуры в отделениях (кабинетах) рентгенодиагностики. Часть 1. Общие требования (<https://docs.cntd.ru/document/1200012982>); ГОСТ Р МЭК 61223-3-5-2008 Оценка и контроль эксплуатационных параметров в отделениях лучевой диагностики. Часть 3–5. Приемочные испытания. Оценка эксплуатационных характеристик рентгеновской аппаратуры для компьютерной томографии (<https://docs.cntd.ru/document/1200071695>); ГОСТ Р МЭК 60601-2-44-2013 Изделия медицинские электрические. Часть 2–44. Частные требования безопасности с учетом основных функциональных характеристик к рентгеновским компьютерным томографам (<https://docs.cntd.ru/document/1200105919>).

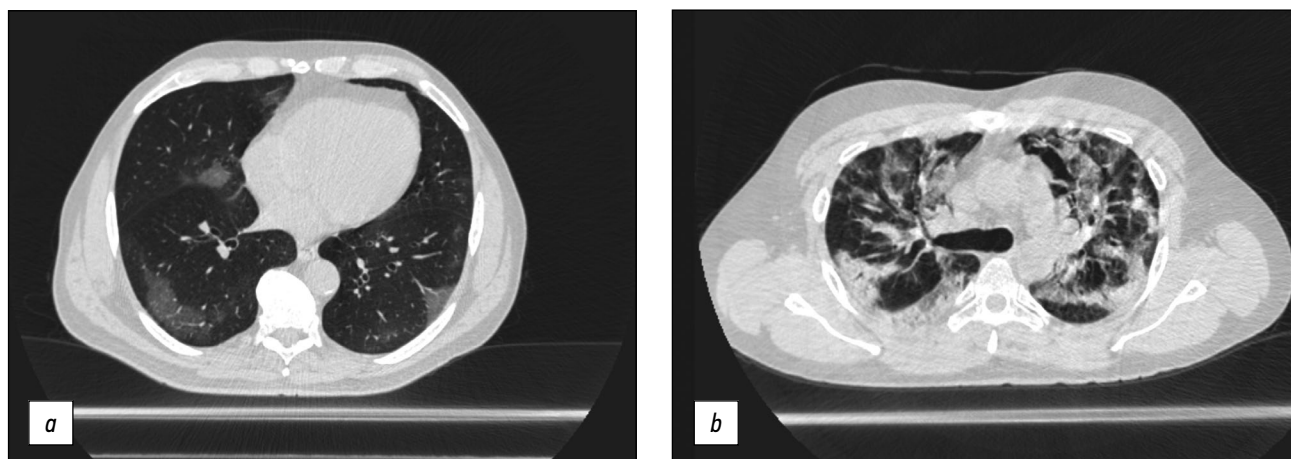


Рис. 5. Аксиальные компьютерно-томографические срезы органов грудной клетки в лёгочном окне: *a* — определяются полиморфные, преимущественно субплевральные участки уплотнения паренхимы лёгких по типу матового стекла, что соответствует КТ-картине вирусной пневмонии (в том числе COVID-19), тяжесть поражения КТ-1; *b* — определяются многочисленные полиморфные с тенденцией к слиянию участки уплотнения паренхимы по типу консолидации в сочетании с участками «матового стекла» и слабовыраженными ретикулярными изменениями, тяжесть поражения КТ-3.

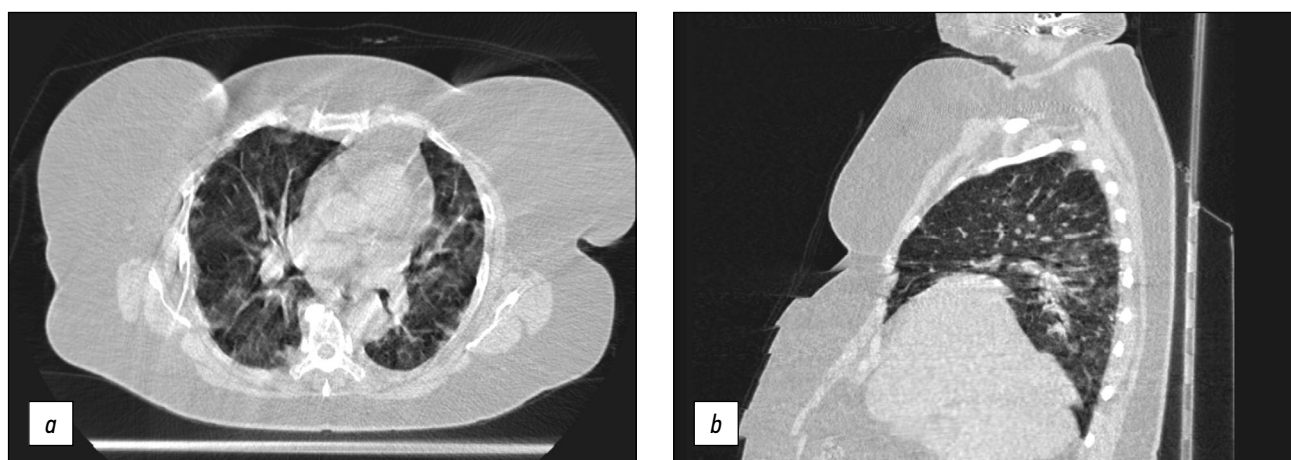


Рис. 6. Аксиальный и сагиттальный компьютерно-томографические срезы органов грудной клетки в лёгочном окне: *a* — артефакты движения; *b* — ступеньки (motion-, step-артефакты), вызванные дыхательными движениями грудной клетки в момент сканирования.

кардиогенным отёком лёгких и бактериальной пневмонией. На рис. 5 представлены результаты КТ-исследования пациентов с COVID-19-ассоциированной вирусной пневмонией.

Длительное (15–25 секунд) сканирование, по сравнению со стационарными КТ (3–5 секунд), не позволяло пациентам с дыхательной недостаточностью задерживать дыхание на всё время проведения исследования. Из-за этого на КТ-изображениях возникали артефакты движения (рис. 6, *a*) и ступеньки (рис. 6, *b*) — motion-, step-артефакты, вызванные дыхательными движениями грудной клетки.

Головной мозг. КТ-исследования головного мозга и костей черепа проводились с целью диагностики острого нарушения мозгового кровообращения, внутричерепных гематом, новообразований головного мозга и травматических повреждений костей черепа (рис. 7).

Отмечено, что КТ-изображения головного мозга сопровождаются артефактами различной природы: артефакты

ветряной мельницы (windmill) (рис. 8, *a*), комбинирующиеся с линейными артефактами (strike) и спирального сканирования (helical) [5], артефактами, усиливающимися на основании черепа, где существенную роль также начинают играть артефакты, вызванные эффектом увеличения жёсткости излучения (beam hardening) и рассеяния (scattering) (рис. 8, *b*), в связи с чем оценка субтенториальных областей головного мозга была затруднительна.

Органы брюшной полости. КТ-исследования органов брюшной полости проводились с целью диагностики острой патологии брюшной полости при подозрении на кишечную непроходимость, для выявления свободной жидкости или газа (рис. 9).

При исследовании органов брюшной полости также выявлялись артефакты на границе сред со значительными различиями в плотности: газ в кишечнике и окружающие мягкие ткани (gas-interface artifact), артефакты спирального сканирования (helical).

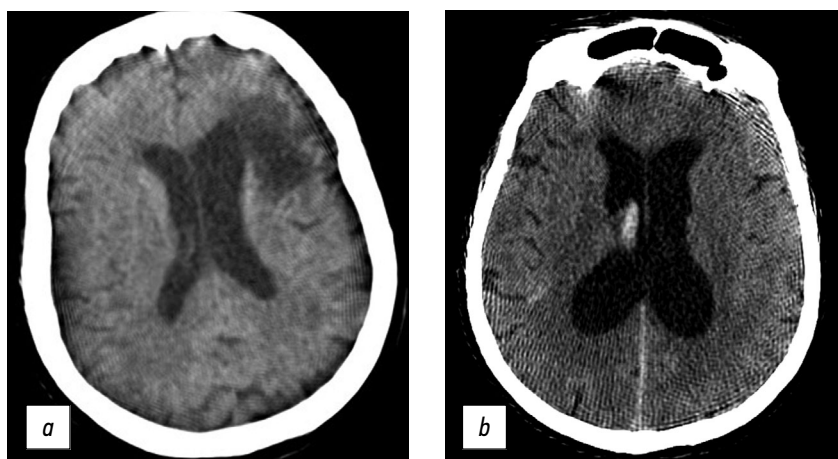


Рис. 7. Аксиальные компьютерно-томографические изображения головного мозга: *a* — реконструкция 3 мм участка пониженной плотности у переднего рога левого бокового желудочка, перивентрикулярно, субкортикально (КТ-картина подострого нарушения мозгового кровообращения в бассейне левой средней мозговой артерии); *b* — участок (1 мм) субарахноидального кровоизлияния с прорывом крови в желудочковую систему (викарная гидроцефалия).

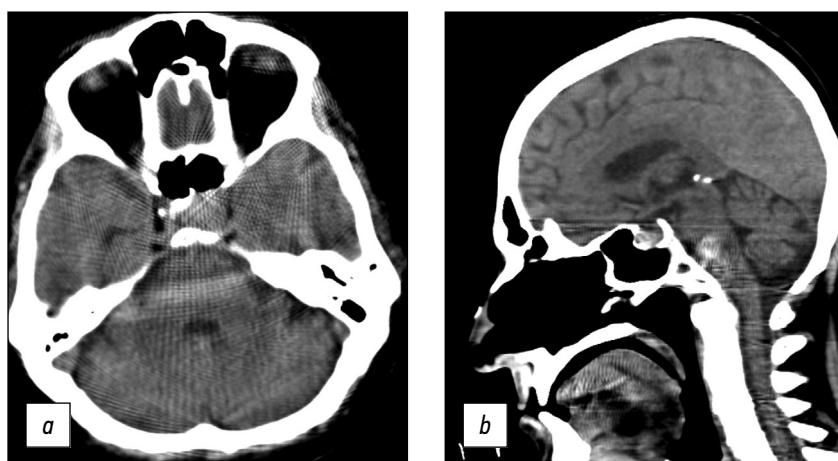


Рис. 8. На аксиальном (*a*) и сагиттальном (*b*) компьютерно-томографическом изображении головы в области задней черепной ямки и основания черепа определяются артефакты ветряной мельницы (windmill), линейные артефакты (strike), а также вызванные эффектами усиления жёсткости луча (beam hardening) и рассеяния (scattering). Оценка изображения вблизи костных структур и задней черепной ямки затруднена.

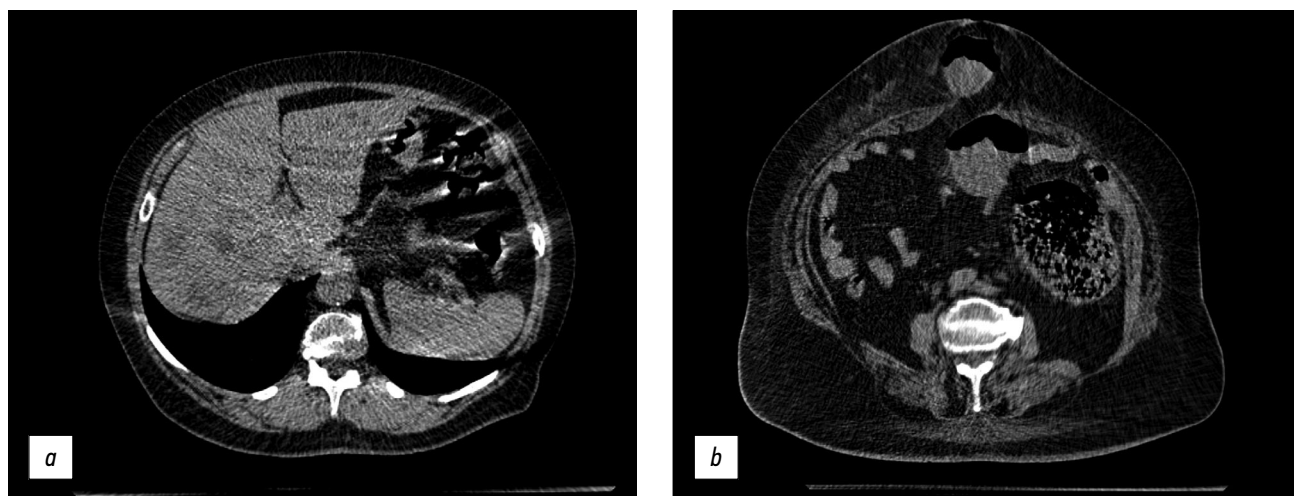


Рис. 9. Аксиальные компьютерно-томографические изображения органов брюшной полости: *a* — КТ-картина многочисленных гиподенсных образований обеих долей печени, артефакты спирального сканирования и обусловленные границей газа (helical, gas interface artifacts) в области кишечника; *b* — КТ-картина ущемлённой пупочной грыжи.

Сканирование с указанными в табл. 1 параметрами позволяло получать изображения достаточного качества для диагностики патологии органов брюшной полости и забрюшинного пространства (жировой гепатоз, жёлчно-каменная болезнь, гиперплазия и инциденталомы надпочечников, кисты почек и мочекаменная болезнь, очаговые образования печени и другие патологические состояния).

Оценка эффективности применения мобильного компьютерного томографа

С начала работы временного резервного госпиталя (11.08.2020) по 31 января 2021 года было проведено 6264 КТ-исследования, из них 6126 (97,80%) — органов грудной клетки, 98 (1,56%) — головного мозга, 31 (0,49%) — органов брюшной полости, 9 (0,14%) — другие. Средняя лучевая нагрузка при КТ-исследовании органов грудной клетки составила 3,22 мЗв, головного мозга — 2,49 мЗв, органов брюшной полости — 8,46 мЗв.

Для оценки эффективности применения КТ рассчитывался параметр загрузки, равный отношению среднего числа исследований в день к их нормативному значению для Москвы (41 исследование в сутки для трёхсменного режима работы): в среднем выполнялось 44 исследования в сутки при трёхсменном режиме работы (от 14 исследований на начальном этапе работы временного госпиталя до 110 исследований и более в сутки при наибольшем потоке госпитализаций), что составило 106% от рекомендованной загрузки. Сравнение использования мобильного КТ Airo TruCT со стационарными КТ модели Aquilion Prime либо Revolution EVO показало сопоставимые уровни загрузки: для данных стационарных КТ в двух медицинских организациях загрузка составила в среднем 113%. Как было отмечено выше, исследований с контрастным усилением не проводилось.

Указанная загрузка демонстрирует высокую эффективность применения данного оборудования, обосновывает целесообразность использования мобильного КТ во временных госпиталях. Однако при интенсивной работе мобильного КТ отмечалось появление технических ошибок, что впоследствии могло привести к остановке работы оборудования для ремонта. Чтобы продлить время работы мобильного КТ и избежать возникновения технических проблем, производитель рекомендует проводить не более 6 исследований в час.

ОБСУЖДЕНИЕ

Пандемия коронавирусной инфекции COVID-19 подняла следующие вопросы организации помощи пациентам в условиях стационаров: увеличение коечного фонда, организация временных госпиталей и материально-техническое обеспечение этих решений [6].

Одним из решений для обеспечения доступности КТ-исследований во временных госпиталях является оснащение и применение мобильных компактных компьютерных

томографов. В данной работе обобщён опыт применения мобильного КТ Airo TruCT. Данное диагностическое устройство имеет такие несомненные преимущества, как неприхотливость к параметрам энергообеспечения, упрощённый монтаж и мобильность устройства, что позволило в короткие сроки выполнить проектирование помещения для размещения мобильного КТ и оперативно ввести в эксплуатацию данное оборудование.

Мобильный КТ позволил получить КТ-изображения органов грудной клетки приемлемого для диагностики вирусной пневмонии качества (см. рис. 5 а), а пропускная способность в форсированном режиме обеспечила доступность КТ-исследований для временного госпиталя на 1300 коек. Пиковая нагрузка составила 110 исследований в сутки, а среднее значение — 44. Такое решение отличается от модульных и мобильных КТ, развёрнутых на трейлерах [7], при этом основное различие заключается в ином типе применяемого КТ.

Между тем был отмечен ряд ограничений, позволяющих рассматривать установку мобильного КТ в текущей модификации как вынужденное решение. Так, медленная скорость сканирования по сравнению со стационарными КТ-сканерами приводит к возникновению артефактов от движений. Для уменьшения количества артефактов от дыхательных движений было предложено проводить КТ-сканирование органов грудной клетки в каудокраниальном направлении [8]. В рассмотренном примере использования Airo TruCT это было невозможно из-за особенностей планировки процедурной комнаты (ограничение движения гентри томографа, вызванное недостаточной длиной провода консоли управления). Проблема была решена путём отсроченной команды на задержку дыхания примерно через 3–4 секунды от начала сканирования. Несмотря на то, что на КТ-изображениях в апикальных сегментах лёгких отмечались артефакты движения и ступеньки, базальные отделы визуализировались оптимально. Это важно, поскольку участки уплотнения паренхимы лёгких по типу матового стекла или консолидации при вирусной пневмонии, вызванной коронавирусной инфекцией COVID-19, располагаются именно в дорсальных отделах нижних долей [9]. Также были применены несложные технические решения, адаптирующие нестандартное применение мобильного КТ Airo TruCT, — портативные рации и видеосвязь. Выявленное значительное количество артефактов требует разработки дополнительных алгоритмов сканирования, реконструкции и постобработки, а также оптимизации параметров сканирования [10].

Несмотря на мобильность и простоту установки мобильного КТ, помещение аппаратной должно быть спроектировано с учётом всех требований радиационной безопасности (см. рис. 2).

Помимо временных резервных госпиталей для лечения пациентов с COVID-19, применение мобильного КТ может быть эффективно в медицинских учреждениях,

где невозможно установить стационарный компьютерный томограф или где основной компьютерный томограф вышел из строя. Мобильные КТ могут быть использованы в удалённых населённых пунктах и при развёртывании временных мобильных госпиталей для ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций.

Применение мобильных КТ открывает в том числе новые возможности для проведения научных исследований: например, мобильный КТ, о котором шла речь в данной публикации, применялся в научном исследовании по влиянию новой коронавирусной инфекции COVID-19 на сердечно-сосудистую систему [11]. Применение мобильного КТ Airo TruCT обеспечило необходимую диагностическую эффективность при проведении исследований органов грудной клетки, головного мозга, а также органов брюшной полости и забрюшинного пространства в условиях временного госпиталя для лечения пациентов с COVID-19.

Выявленные недостатки позволили сформировать список требований к мобильным КТ, обосновать необходимость разработки нового типа КТ-оборудования, а именно: нетребовательного к энергопитанию; с возможностью быстрого проектирования помещений для разворачивания во временных госпиталях, возможностью использованию в условиях чрезвычайных ситуаций, а также в отдалённых районах с неподготовленной инфраструктурой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Инсталляция мобильного КТ в резервном госпитале для лечения пациентов с новой коронавирусной инфекцией COVID-19 была вынужденной мерой, обусловленной стремительным развитием пандемии. Мобильный КТ Airo TruCT предназначен для работы в условиях нейрохирургических операционных, однако, несмотря на «нецелевое» использование мобильного КТ, удалось обеспечить удовлетворительное качество выполняемых исследований. Альтернативой мобильному КТ может быть стационарный КТ, размещённый в трейлере или отдельном модуле, но такой тип оборудования имеет свои недостатки (например, сложность транспортировки и размещение вне медицинского учреждения; сложность сканирования пациентов в тяжёлом состоянии). В свою очередь, КТ Airo TruCT обладает высокой мобильностью и упрощёнными требованиями к помещению и электропитанию, а для его перемещения требуется участие лишь одного человека, но высокая мобильность этого устройства сказывается на качестве диагностических изображений.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Источник финансирования. Данная статья подготовлена авторским коллективом в рамках НИР «Научно-методические основы цифровой трансформации службы лучевой диагностики»,

(№ ЕГИСУ: № 123031400118-0) в соответствии с Приказом Департамента здравоохранения города Москвы от 21.12.2022 № 1196 «Об утверждении государственных заданий, финансовое обеспечение которых осуществляется за счет средств бюджета города Москвы, государственным бюджетным (автономным) учреждениям, подведомственным Департаменту здравоохранения города Москвы, на 2023 год и плановый период 2024 и 2025 годов».

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение поисково-аналитической работы и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распределён следующим образом: Н.Д. Кудрявцев — концепция публикации, написание текста, клинический анализ работы мобильного КТ; А.В. Петрайкин — клинический анализ качества работы мобильного КТ; Е.С. Ахмад — технический контроль качества эксплуатационных параметров, написание текста; Ф.А. Киселев, В.В. Бурашов — технический контроль качества эксплуатационных параметров мобильного КТ; А.Н. Мухортова — оценка эффективности применения мобильного КТ; И.В. Солдатов — проектирование отделения лучевой диагностики, редактирование текста; А.С. Шкода — организация работы отделения лучевой диагностики, редактирование текста.

ADDITIONAL INFORMATION

Funding source. This article was prepared by a group of authors as a part of the research and development effort titled “Theoretical and methodological framework for digital transformation in radiology”, (USIS No. 123031400118-0) in accordance with the Order No. 1196 dated December 21, 2022 “On approval of state assignments funded by means of allocations from the budget of the city of Moscow to the state budgetary (autonomous) institutions subordinate to the Moscow Health Care Department, for 2023 and the planned period of 2024 and 2025” issued by the Moscow Health Care Department.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work. N.D. Kudryavtsev — the concept of publication, text writing, clinical analysis of mobile CT; A.V. Petraikin — clinical analysis of mobile CT; E.S. Akhmad — technical quality control of mobile CT, text writing; F.A. Kiselev, V.V. Burashov — technical quality control of mobile CT; A.N. Mukhortova — evaluation of the effectiveness of the use of mobile CT; I.V. Soldatov — design of the radiology department, text editing; A.S. Shkoda — organization of the work in the radiology department, text editing.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Morozov S.P., Kuzmina E.S., Ledikhova N.V., et al. Mobilizing the academic and practical potential of diagnostic radiology during the COVID-19 pandemic in Moscow // *Digital Diagnostics*. 2020. Vol. 1, N 1. P. 5–12. doi: 10.17816/DD51043
2. Профилактика, диагностика и лечение новой коронавирусной инфекции (2019-nCoV): временные методические рекомендации. Версия 17 (14.12.2022). Режим доступа: https://static-0.minzdrav.gov.ru/system/attachments/attachements/000/061/254/original/%D0%92%D0%9C%D0%A0_COVID-19_V17.pdf?1671088207. Дата обращения: 15.03.2023.
3. De Smet K., De Smet D., Ryckaert T., et al. Diagnostic performance of chest CT for SARS-CoV-2 infection in individuals with or without COVID-19 symptoms // *Radiology*. 2021. Vol. 298, N 1. P. E30–E37. doi: 10.1148/radiol.2020202708
4. Huang Y., Cheng W., Zhao N., et al. CT screening for early diagnosis of SARS-CoV-2 infection // *Lancet Infect Dis*. 2020. Vol. 20, N 9. P. 1010–1011. doi: 10.1016/S1473-3099(20)30241-3
5. Barrett J.F., Keat N. Artifacts in CT: Recognition and avoidance // *RadioGraphics*. 2004. Vol. 24, N 6. P. 1679–1691. doi: 10.1148/rg.246045065
6. Самородская И.В., Ларина В.Н., Назимкин К.Е., Ларин В.Г. Организационные и клинические проблемы диагностики COVID-19 на амбулаторном этапе // *Врач*. 2020. Т. 31, № 5. С. 23–30. doi: 10.29296/25877305-2020-05-05
7. Cester G., Giraudo C., Causin F., et al. Retrospective analysis of a modified organizational model to guarantee CT workflow during the COVID-19 outbreak in the Tertiary Hospital of Padova, Italy // *J Clin Med*. 2020. Vol. 9, N 9. P. 3042. doi: 10.3390/jcm9093042
8. Bates D.D., Vintonyak A., Mohabir R., et al. Use of a portable computed tomography scanner for chest imaging of COVID-19 patients in the urgent care at a tertiary cancer center // *Emerg Radiol*. 2020. Vol. 27, N 6. P. 597–600. doi: 10.1007/s10140-020-01801-5
9. Христенко Е.А., фон Стакельберг О., Кауцор Х.У., et al. КТ-паттерны при COVID-19-ассоциированных пневмониях: стандартизация описания исследований на основе глоссария общества Флейшнера // *Rejr*. 2020. Т. 10, № 1. С. 16–26. doi: 10.21569/2222-7415-2020-10-1-16-26
10. Kyriakou Y., Meyer E., Prell D., Kachelriess M. Empirical beam hardening correction (EBHC) for CT // *Med Phys*. 2010. Vol. 37, N 10. P. 5179–5187. doi: 10.1118/1.3477088
11. Aliev A.F., Kudryavtsev N.D., Petryaykin A.V., et al. Changing of pulmonary artery diameter in accordance with severity of COVID-19 (assessment based on non-contrast computer tomography) // *Digital Diagnostics*. 2021. Vol. 2, N 3. P. 249–260. doi: 10.17816/DD76726

REFERENCES

1. Morozov SP, Kuzmina ES, Ledikhova NV, et al. Mobilizing the academic and practical potential of diagnostic radiology during the COVID-19 pandemic in Moscow. *Digital Diagnostics*. 2020;1(1):5–12. (In Russ). doi: 10.17816/DD51043
2. Prevention, diagnosis and treatment of new coronavirus infection (2019-nCoV): temporary guidelines. Version 17 (12/14/2022). (In Russ). Available from: https://static-0.minzdrav.gov.ru/system/attachments/attachements/000/061/254/original/%D0%92%D0%9C%D0%A0_COVID-19_V17.pdf?1671088207. Accessed: 15.03.2023. (
3. De Smet K, De Smet D, Ryckaert T, et al. Diagnostic performance of chest CT for SARS-CoV-2 infection in individuals with or without COVID-19 symptoms. *Radiology*. 2021;298(1):E30–E37. doi: 10.1148/radiol.2020202708
4. Huang Y, Cheng W, Zhao N, et al. CT screening for early diagnosis of SARS-CoV-2 infection. *Lancet Inf Dis*. 2020;20(9):1010–1011. doi: 10.1016/S1473-3099(20)30241-3
5. Barrett JF, Keat N. Artifacts in CT: Recognition and avoidance. *RadioGraphics*. 2004;24(6):1679–1691. doi: 10.1148/rg.246045065
6. Samorodskaja IV, Larina VN, Nazimkin KE, Larin VG. Organizational and clinical problems of outpatient COVID-19 diagnostics. *Vrach*. 2020;31(5):23–30. (In Russ). doi: 10.29296/25877305-2020-05-05
7. Cester G, Giraudo C, Causin F, et al. Retrospective analysis of a modified organizational model to guarantee CT workflow during the COVID-19 outbreak in the Tertiary Hospital of Padova, Italy. *J Clin Med*. 2020;9(9):3042. doi: 10.3390/jcm9093042
8. Bates DD, Vintonyak A, Mohabir R, et al. Use of a portable computed tomography scanner for chest imaging of COVID-19 patients in the urgent care at a tertiary cancer center. *Emerg Radiol*. 2020;27(6):597–600. doi: 10.1007/s10140-020-01801-5
9. Khristenko EA, von Stackelberg O, Kautsor HU, et al. CT patterns in COVID-19 associated pneumonia: Standardization of research descriptions based on the Fleischner Society Glossary. *Rejr*. 2020;10(1):16–26. (In Russ). doi: 10.21569/2222-7415-2020-10-1-16-26
10. Kyriakou Y, Meyer E, Prell D, Kachelriess M. Empirical beam hardening correction (EBHC) for CT. *Med Phys*. 2010;37(10):5179–5187. doi: 10.1118/1.3477088
11. Aliev AF, Kudryavtsev ND, Petryaykin AV, et al. Changing of pulmonary artery diameter in accordance with severity of COVID-19 (assessment based on non-contrast computer tomography). *Digital Diagnostics*. 2021;2(3):249–260. (In Russ). doi: 10.17816/DD76726

ОБ АВТОРАХ

* Кудрявцев Никита Дмитриевич;

адрес: Россия, 127051, Москва, ул. Петровка, д. 24, стр. 1;
ORCID: 0000-0003-4203-0630;
eLibrary SPIN: 1125-8637;
e-mail: KudryavtsevND@zdrav.mos.ru

AUTHORS' INFO

* Nikita D. Kudryavtsev;

address: 24/1 Petrovka street, 127051 Moscow, Russia;
ORCID: 0000-0003-4203-0630;
eLibrary SPIN: 1125-8637;
e-mail: KudryavtsevND@zdrav.mos.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Петряйкин Алексей Владимирович, д-р мед. наук, доцент;
ORCID: 0000-0003-1694-4682;
eLibrary SPIN: 6193-1656;
e-mail: PetryajkinAV@zdrav.mos.ru

Ахмад Екатерина Сергеевна;
ORCID: 0000-0002-8235-9361;
eLibrary SPIN: 5891-4384;
e-mail: AkhmadES@zdrav.mos.ru

Киселев Федор Алексеевич;
ORCID: 0009-0006-6472-8940;
e-mail: KiselevFA@zdrav.mos.ru

Бурашов Вячеслав Владимирович;
ORCID: 0000-0001-9250-0667;
eLibrary SPIN: 4308-0912;
e-mail: BurashovVV@zdrav.mos.ru

Мухортова Анна Николаевна;
ORCID: 0000-0001-9814-3533;
eLibrary SPIN: 9051-1130;
e-mail: MukhortovaAN@zdrav.mos.ru

Солдатов Илья Владимирович;
ORCID: 0000-0002-4867-0746;
eLibrary SPIN: 4065-6048;
e-mail: SoldatovIV2@zdrav.mos.ru

Шкода Андрей Сергеевич, д-р мед. наук, профессор;
ORCID: 0000-0002-9783-1796;
eLibrary SPIN: 4520-2141;
e-mail: gkb67@zdrav.mos.ru

Alexey V. Petraikin, MD, Dr. Sci. (Med.), Associate Professor;
ORCID: 0000-0003-1694-4682;
eLibrary SPIN: 6193-1656;
e-mail: PetryajkinAV@zdrav.mos.ru

Ekaterina S. Akhmad;
ORCID: 0000-0002-8235-9361;
eLibrary SPIN: 5891-4384;
e-mail: AkhmadES@zdrav.mos.ru

Fyodor A. Kiselev;
ORCID: 0009-0006-6472-8940;
e-mail: KiselevFA@zdrav.mos.ru

Vyacheslav V. Burashov;
ORCID: 0000-0001-9250-0667;
eLibrary SPIN: 4308-0912;
e-mail: BurashovVV@zdrav.mos.ru

Anna N. Mukhortova;
ORCID: 0000-0001-9814-3533;
eLibrary SPIN: 9051-1130;
e-mail: MukhortovaAN@zdrav.mos.ru

Ilya V. Soldatov;
ORCID: 0000-0002-4867-0746;
eLibrary SPIN: 4065-6048;
e-mail: SoldatovIV2@zdrav.mos.ru

Andrey S. Shkoda, MD, Dr. Sci. (Med), Professor;
ORCID: 0000-0002-9783-1796;
eLibrary SPIN: 4520-2141;
e-mail: gkb67@zdrav.mos.ru

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD514629>

Система менеджмента качества: инструмент развития организации или дополнительная нагрузка?

С.Ю. Заюнчковский, С.А. Коновалов, В.В. Зинченко, Д.Е. Шарова,
Е.С. Ахмад, А.В. Владзимирский

Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий, Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Система менеджмента качества представляет собой основную систему управления организацией, которая направлена на обеспечение главного свойства выпускаемой продукции — качества. Основу поддержки качества на производстве выполняет система менеджмента качества с главной целью — быть готовыми к удовлетворению меняющейся потребительской ценности, а также всегда учитывать удовлетворённость самих потребителей. Говоря о производстве медицинских изделий, систему менеджмента качества в данной отрасли можно определить как организационную структуру, её функции, процедуры, процессы и ресурсы, необходимые для руководства и управления относительно качества медицинской продукции.

В статье отражены принципы системы менеджмента качества и процессы управления. Основное внимание уделено особенностям системы менеджмента качества медицинских изделий, в том числе особенностям системы менеджмента качества программного обеспечения, являющего медицинским изделием. Отмечены условия, при которых система менеджмента качества становится инструментом для обеспечения устойчивого развития организации и не представляется дополнительной нагрузкой, не имеющей необходимости. Представлены результаты опроса организаций, выпускающих медицинские программные изделия, связанные с опытом внедрения системы менеджмента качества, а также готовности к изменениям в организации.

Ключевые слова: система менеджмента качества; медицинское изделие; программное обеспечение; искусственный интеллект.

Как цитировать:

Заюнчковский С.Ю., Коновалов С.А., Зинченко В.В., Шарова Д.Е., Ахмад Е.С., Владзимирский А.В. Система менеджмента качества: инструмент развития организации или дополнительная нагрузка? // *Digital Diagnostics*. 2023. Т. 4, № 3. С. 439–447. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD514629>

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD514629>

Quality management system: A tool for the development of the organization or an additional burden?

Sergey Yu. Zayunchkovsky, Sergey A. Konovalov, Viktoria V. Zinchenko,
Daria E. Sharova, Ekaterina S. Akhmad, Anton V. Vladzimirskyy

Moscow Center for Diagnostics and Telemedicine, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

A quality management system constitutes one of the organization's management systems that provides for the selection of a set of processes in the organization's activities designed to ensure the stable quality of products and services provided.

The growth of global industrial production has underscored the need for the creation of such production and management systems. These systems are designed to ensure that enterprises remains prepared to meet the constantly changing consumer value of manufactured products in accordance with consumer requirements, as well as the satisfaction of consumers themselves. As a result, attention began to focus on the production processes implemented within the organization when creating products. Regarding the production of medical devices, a quality management system can be defined as an organizational structure encompassing its functions, procedures, processes, and resources necessary for the coordinated direction and management of a manufacturing organization with respect to the quality of medical products.

The article reflects the principles of the quality management system and management processes. Noteworthy emphasis is placed on the features of quality management systems for medical devices, including the features of the quality management system for software that is a medical device. Furthermore, the conditions under which the quality management system becomes a tool for ensuring the sustainable development of the organization are noted.

Keywords: quality management system; medical device; software; artificial intelligence.

To cite this article:

Zayunchkovsky SYu, Konovalov SA, Zinchenko VV, Sharova DE, Akhmad ES, Vladzimirskyy AV. Quality management system: A tool for the development of the organization or an additional burden? *Digital Diagnostics*. 2023;4(3):439–447. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD514629>

Received: 27.06.2023

Accepted: 06.07.2023

Published: 30.08.2023

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD514629>

质量管理体系：组织发展的工具还是额外负担？

Sergey Yu. Zayunchkovsky, Sergey A. Konovalov, Viktoria V. Zinchenko,
Daria E. Sharova, Ekaterina S. Akhmad, Anton V. Vladzimirskyy

Moscow Center for Diagnostics and Telemedicine, Moscow, Russian Federation

简评

质量管理体系是组织的管理体系之一，它规定了组织活动中的一系列流程，旨在确保产品和服务的稳定质量。

随着全球工业生产的增长，有必要建立特殊的生产和管理系统，以确保企业能够根据消费者的要求随时满足制成品不断变化的客户价值，并使消费者本身感到满意。在这方面，人们开始关注组织内部在创造产品时实施的生产流程。就医疗器械生产而言，质量管理体系可定义为：与医疗产品质量有关的生产组织的协调领导和管理所需的组织结构、职能、程序、流程和资源。

该文章介绍质量管理体系的原则和管理流程。主要关注医疗器械质量管理体系的特殊性，包括作为医疗器械的软件质量管理体系的特殊性。本文指出质量管理体系成为确保组织可持续发展工具的条件。

关键词：质量管理体系；医疗器械；软件；人工智能。

引用本文：

Zayunchkovsky SYu, Konovalov SA, Zinchenko VV, Sharova DE, Akhmad ES, Vladzimirskyy AV. 质量管理体系：组织发展的工具还是额外负担？
Digital Diagnostics. 2023;4(3):439–447. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD514629>

收到：27.06.2023

接受：06.07.2023

发布日期：30.08.2023

ВВЕДЕНИЕ

Универсальность принципов системы менеджмента качества

Система менеджмента качества (СМК) — одна из систем управления организацией. СМК предусматривает выделение набора процессов в деятельности организации, направленных на обеспечение стабильного качества выпускаемой продукции и оказываемых услуг. СМК призвана улучшить содержание этих процессов как совокупности взаимосвязанных и взаимодействующих видов деятельности и сформировать такой стиль управления организацией, при котором руководители, инженерно-технические работники, обеспечивающий работу персонал вовлекаются в процесс улучшения качества поставляемой продукции. При внедрении СМК происходят изменения, которые направлены на установление технологической прозрачности всех видов деятельности. Вводимые правила позволяют проследить весь жизненный путь продукции, в который вовлечена организация с момента принятия решения о создании продукции до завершающего этапа — её утилизации. В итоге это приводит к установлению порядка в деятельности, самореализации участников процессов, совершенствованию выпускаемой продукции и улучшению конкурентоспособности организации в целом.

Согласно международному стандарту ISO 9001¹, схема построения СМК в организации носит универсальный характер, поэтому важно выделить особенности проводимых видов деятельности и умело разбить их на собственные ключевые процессы.

Основные процессы организации (предприятия) в России

Управление организацией в России долгое время носило исключительно «функциональный» характер. Такой подход был вполне жизнеспособен и заключался в основном в том, чтобы распределить ответственность за выполнение отдельных функций по конкретным направлениям деятельности организации (проектирование, производство, снабжение, сбыт, хозяйственное и инфраструктурное обслуживание, послепродажный сервис) между соответствующими функционалами своих руководителей и исполнителей. При этом цель такого управления, осуществляемого руководителями функционалов (начальниками служб, отделов и структурных подразделений более высокого уровня), сводилась к тому, чтобы обеспечить соответствие конкретной

(узкоспециализированной) функциональной деятельности исполнителей внутренним критериям качества, которые устанавливались стандартами самой организации [1]. Однако по мере роста мирового промышленного производства функциональный подход в управлении всё чаще стал демонстрировать свои несостоятельность и неэффективность. В результате возникла необходимость создания таких систем производства и управления, которые могли бы обеспечить, с одной стороны, удовлетворённость потребителей путём предоставления им максимальных потребительских ценностей, с другой — способность самих предприятий быть готовыми к удовлетворению постоянно меняющейся потребительской ценности производимой продукции в соответствии с требованиями потребителей. В этой связи внимание стало акцентироваться на производственных процессах, реализуемых в рамках организации при создании продукции.

Применительно к производству медицинских изделий СМК может быть определена как организационная структура, её функции, процедуры, процессы и ресурсы, необходимые для скоординированной деятельности по руководству и управлению организацией-производителем медицинской продукции применительно к качеству. СМК медицинских изделий должна обеспечивать соответствие выпускаемых в обращение медицинских изделий применимым к ним общим требованиям безопасности и эффективности, требованиям к их маркировке, технической и эксплуатационной документации. Следует отметить, что обязанность внедрять и применять СМК при обращении медицинских изделий не является безусловной: не все обязаны внедрять и поддерживать СМК медицинских изделий, но все вправе.

СИСТЕМА МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА МЕДИЦИНСКИХ ИЗДЕЛИЙ

В настоящее время формируется тенденция обеспечения качества и безопасности медицинских изделий на всех этапах жизненного цикла изделия. Регулирующие органы в области медицинских изделий переходят от требований к процессу проектирования и разработки изделий к требованиям полного жизненного цикла обращения медицинских изделий — от производства до вывода из эксплуатации. Такой подход нашёл отражение в международном стандарте ISO 13485².

Эффективное управление медицинскими изделиями на протяжении всего их жизненного цикла является важнейшим процессом, обеспечивающим их безопасность

¹ ISO 9001:2015 Quality management systems — Requirements. This standard was last reviewed and confirmed in 2021. Therefore this version remains current. Режим доступа: <https://www.iso.org/standard/62085.html>.

² ISO 13485:2016 Medical devices. Quality management systems. Requirements for regulatory purposes. This standard was last reviewed and confirmed in 2020. Therefore this version remains current. Режим доступа: <https://www.iso.org/standard/59752.html>.

для конечного пользователя [2]. Так, в соответствии с Регламентом Европейского парламента и Совета Европейского союза (ЕС) 2017/745 [3] о медицинских изделиях, CE сертификация медицинских изделий строится на оценке процедур, регламентирующих разработку и производство изделий. Одним из этапов CE сертификации медицинских изделий является подтверждение соответствия СМК требованиям ISO 13485.

В рамках нормативного регулирования обращения медицинских изделий на территории Евразийского экономического союза производители медицинских изделий (за исключением производителей медицинских изделий класса потенциального риска применения 1 и нестерильных медицинских изделий класса потенциального риска применения 2а) до представления документов для регистрации медицинских изделий обязаны внедрить СМК медицинских изделий в зависимости от класса потенциального риска их применения^{3, 4}. На рис. 1 представлена схема требований к внедрению СМК медицинских изделий в зависимости от потенциального риска их применения. Если производитель медицинских изделий внедрил СМК в соответствии с требованиями стандартов, эквивалентных международному стандарту ISO 13485, то доказательства соответствия СМК требованиям данных стандартов (сертификат соответствия, отчёты об аудите СМК медицинских изделий) обеспечивают её соответствие требованиям, утверждённым Решением Совета Евразийской экономической комиссии от 10.11.2017 № 106 в части

процессов и процедур, связанных с функционированием СМК медицинских изделий⁵.

Особенности системы менеджмента качества медицинских изделий

Особенности СМК медицинских изделий основаны на определённых требованиях к продукции — медицинским изделиям — и вытекающих из этих требований свойствах таких изделий. Эти свойства должны быть либо уникальными, либо им должно уделяться особое внимание по сравнению с другими видами промышленной продукции, они сформулированы в основополагающих документах, регламентирующих сферу проектирования, разработки и обращения медицинских изделий. К требованиям относятся безопасность медицинского изделия, эффективность и качество. СМК медицинских изделий должна способствовать обеспечению этих требований. В самом общем случае предприятие (организация) должно выполнять нижеследующие условия (в соответствии с ISO 13485):

- выявлять текущие риски и нюансы их возникновения;
- осуществлять мониторинг/анализ рисков, а также исследование параметров на регулярной основе;
- выполнять контроль деятельности организации изнутри;
- обеспечить возможность внесения необходимых корректировок;



Рис. 1. Требования к внедрению системы менеджмента качества медицинских изделий в зависимости от потенциального риска их применения. МИ — медицинские изделия; СМК — система менеджмента качества; РД — руководящий документ.

³ Постановление Правительства РФ от 09.02.2022 N 136 «Об утверждении требований к внедрению, поддержанию и оценке системы управления качеством медицинских изделий в зависимости от потенциального риска их применения». Режим доступа: <https://base.garant.ru/403517950/>.

⁴ Решение Совета Евразийской экономической комиссии от 10.11.2017 № 106 «Об утверждении Требований к внедрению, поддержанию и оценке системы менеджмента качества медицинских изделий в зависимости от потенциального риска их применения». Режим доступа: <https://pharmvestnik.ru/documents/reshenie-soveta-evrazijskoj-ekonomicheskoy-komissii-ot-10-11-2017-g-106.html>.

⁵ Там же.

- усовершенствовать систему менеджмента качества медицинских изделий, охватывая её отдельные составляющие;
- заниматься разработкой вспомогательной документации, а также выполнять другие условия, указанные в ISO 13485.

СМК медицинских изделий должна быть выстроена таким образом, чтобы способствовать выполнению ключевого условия — обеспечить преобладание пользы над возможными неблагоприятными результатами. Медицинские изделия должны быть безопасными. Важной особенностью СМК медицинских изделий является также необходимость обеспечения его эффективности. Без требования эффективности медицинских изделий пропадает сам смысл производства и существования такого изделия. Обобщающей характеристикой медицинского изделия является его качество, понимаемое как совокупность свойств и характеристик медицинских изделий, влияющих на его способность действовать по назначению при условии соответствия требованиям документации производителя.

Особо следует выделить процессы СМК, связанные с оценкой качества, эффективности и безопасности медицинских изделий, которые проходят в первую очередь в рамках государственной регистрации — процедуры, разработанной с целью обеспечения обращения на рынке изделий. Итоговый документ этой процедуры — регистрационное удостоверение, которое является документом, подтверждающим как соответствие медицинского изделия установленным требованиям, так и факт его регистрации на территории России. Регистрационное удостоверение является необходимым документом для обращения медицинского изделия на рынке. Таким образом, процессы, связанные с государственной регистрацией медицинских изделий, также должны найти своё отражение в общей СМК организации, занятой в производстве медицинских изделий. И это ещё одна важная особенность СМК организации, ведущей свою деятельность на территории России.

Резюмируя, важно подчеркнуть, что особенности СМК медицинских изделий заключены в основном в особенностях менеджмента процессов жизненного цикла и обращения медицинских изделий как составной части этих процессов.

Особенности системы менеджмента качества программного обеспечения, являющего медицинским изделием

Говоря о программном обеспечении (ПО), являющемся медицинским изделием, можно выделить дополнительные особенности СМК, и в данном случае они заключаются в процессе производства. В отличие от физического изделия, производство ПО не требует сборки, производственных площадок и т.д., тем не менее производство ПО, являющегося медицинским изделием, также требует

строгого контроля качества и безопасности на всех этапах жизненного цикла изделия.

ПО в отличие от физического изделия может периодически обновляться. Поэтому при каждом обновлении требуется управление качеством, включая анализ дизайна, производительности и рисков. По результату обработки информации ПО выносится предварительное медицинское заключение. Из-за некорректной работы ПО такое заключение может оказаться неверным и нести сопутствующие риски. Для предотвращения подобных случаев, ПО, являющееся медицинским изделием, должно контролироваться при его проектировании, разработке, изготовлении, управлении рисками, а также при корректирующих и предупреждающих действиях в соответствии с СМК.

Кроме того, необходимо управлять рисками безопасности и конфиденциальности, поскольку многие ПО используют коммуникационные технологии, и существует высокий риск кибератак, которые могут привести к сбоям в работе или утечке информации о пациенте. Министерство продовольственной и лекарственной безопасности Республики Корея (Korea Ministry of Food and Drug Safety, MFDS) опубликовало методы применения и подборку примеров, связанных с кибербезопасностью, а также руководящие принципы для утверждения в качестве управления рисками по кибербезопасности [4].

СМК ПО должна включать управление дизайном, разработкой, тестированием, верификацией и валидацией, документацией и обучением персонала. Наличие СМК обеспечивает безопасность, надёжность и эффективность ПО. Организации, работающие в медицинской сфере, должны соблюдать все аспекты СМК для гарантии безопасности и эффективности программного обеспечения.

Особенности системы менеджмента качества программного обеспечения, являющего медицинским изделием, с применением технологий искусственного интеллекта. Национальный стандарт

В целом, СМК программного обеспечения, являющегося медицинским изделием, с применением технологий искусственного интеллекта должна соответствовать требованиям ISO 13485, а также учитывать особенности применения технологий искусственного интеллекта в здравоохранении.

Координацию работ по унификации и стандартизации требований к разработке, тестированию и эксплуатации технологий искусственного интеллекта в здравоохранении осуществляет подкомитет «Искусственный интеллект в здравоохранении» технического комитета по стандартизации «Искусственный интеллект» (ПК 01/ТК164). ПК 01/ТК 164 функционирует на базе Центра диагностики и телемедицины Департамента здравоохранения города Москвы [5]. В рамках деятельности ПК 01/ТК164 разработана серия национальных стандартов с общим групповым

наименованием «Системы искусственного интеллекта в клинической медицине».

Одним из стандартов данной серии является национальный стандарт ГОСТ Р 59921.8-2022⁶. В документ включены рекомендации по трактовке положений всех разделов ГОСТ ISO 13485-2017, а также примеры, описания и варианты, которые могут быть полезны организациям при разработке и внедрении СМК, соответствующей данным требованиям.

Таким образом, производителям технологий искусственного интеллекта при разработке и внедрении СМК необходимо учитывать особенности, описанные выше. Развитие отраслевых требований к СМК от ISO 9001 к ГОСТ Р 59921.8 происходит за счёт уточнения и дополнения требований, связанных с особенностями медицинских изделий, и формирования руководящих указаний по применению ISO 13485 к процессам, связанным с заказом, поставкой, разработкой, осуществлением эксплуатации и сопровождением систем искусственного интеллекта (рис. 2).

Система менеджмента качества программной технологии искусственного интеллекта и её влияние на конкурентоспособность и потенциал организации

СМК технологий искусственного интеллекта оказывает прямое влияние на конкурентоспособность и потенциал организации. Корректное выполнение задач, обеспечение безопасности и эффективности технологий искусственного интеллекта, управление рисками, связанными с их применением, увеличивают доверие пользователей к изделию и способствуют продвижению организации на рынке.

В рамках написания данной статьи был проведён небольшой опрос среди производителей систем искусственного интеллекта. Респондентам было предложено ответить на ряд вопросов о внедрении СМК, соответствующей требованиям ISO 13485. Перечень вопросов представлен в табл. 1. В опросе приняло участие 10 производителей технологий искусственного интеллекта, численность сотрудников опрошенных организаций составляет от 10 до



Рис. 2. Развитие отраслевых требований к системе менеджмента качества технологий искусственного интеллекта, являющихся медицинскими изделиями.

Таблица 1. Опрос производителей технологий искусственного интеллекта относительно наличия, использования и внедрения системы менеджмента качества

№	Вопрос
1	Численность работников
2	Внедрена ли в вашей организации система менеджмента качества (СМК)
3	Если нет, планируются ли разработка и внедрение СМК
4	Имеется ли у вас сертификат соответствия СМК требованиям ISO 13485:2016 или ГОСТ ISO 13485-2017
5	В какой системе сертификации получен сертификат
6	Оцените от 0 до 10, насколько изменились ваши бизнес-процессы после внедрения СМК
7	Оцените от 0 до 10 сопротивление команды внедрению СМК
8	Пользовались ли вы услугами консалтинговой компании при разработке и внедрении СМК
9	Имеется ли у вас в штате сотрудник, ответственный за СМК
10	Пользовались ли вы при разработке и внедрении СМК положениями национального стандарта ГОСТ Р 59921.8-2022 «Системы искусственного интеллекта в клинической медицине. Часть 8. Руководящие указания по применению ГОСТ ISO 13485-2017»
11	Учитывает ли ваша СМК требования, изложенные в Постановлении Правительства РФ от 09.02.2022 № 136 «Об утверждении требований к внедрению, поддержанию и оценке системы управления качеством медицинских изделий в зависимости от потенциального риска их применения»
12	Учитывает ли ваша СМК требования, изложенные в Решении Совета Евразийской экономической комиссии от 10.11.2017 № 106 «Об утверждении Требований к внедрению, поддержанию и оценке системы менеджмента качества медицинских изделий в зависимости от потенциального риска их применения»

⁶ ГОСТ Р 59921.8-2022. Национальный стандарт Российской Федерации «Системы искусственного интеллекта в клинической медицине». Часть 8. Руководящие указания по применению ГОСТ ISO 13485-2017. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200193729>.

600 человек. На вопрос о внедрении СМК 60% опрошенных ответили положительно. Из 40% опрошенных компаний, ответивших на первый вопрос отрицательно, 75% планируют разработать и внедрить СМК. Изменение бизнес-процессов организации после внедрения СМК оценили от 3 до 9 баллов по 10-балльной шкале. Важно отметить, что внедрение СМК может вызвать сопротивление со стороны команды, поэтому на этапе внедрения СМК необходимо обеспечить понимание каждым членом команды значимости данного мероприятия. Оценка уровня сопротивления командой внедрению СМК составляет 40%. Все опрошенные компании, имеющие подтверждение соответствия СМК требованиям ISO 13485, пользовались услугами консалтинговой компании при разработке и внедрении СМК и имеют в штате сотрудника, ответственного за СМК. Национальный стандарт ГОСТ Р 59921.8-2022 при разработке и внедрении СМК использовали 33% опрошенных организаций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной задачей системы СМК медицинских изделий является обеспечение пользы, а не дополнительной нагрузки на организацию в процессе жизненного цикла. Однако интеграция СМК медицинских изделий в текущую деятельность организации является сложным процессом, особенно если наличие СМК медицинских изделий не является обязательным требованием. В этом случае стимулирующим фактором для сертификации по ISO 13485 могут быть повышение статуса предприятия при участии в тендерах, расширение возможностей поставки продукции за пределы Российской Федерации, повышение доверия конечных потребителей и совершенствование внутренних бизнес-процессов. Важно, чтобы интеграция СМК медицинских изделий была проведена не ради формального получения сертификата соответствия, а диктовалась вызревшими внутренними потребностями организации, чтобы СМК медицинских изделий стала инструментом её устойчивого развития.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Источник финансирования. Данная статья подготовлена авторским коллективом в рамках НИР «Научно-методические основы цифровой трансформации службы лучевой диагностики» (№ ЕГИСУ: № 123031400118-0) в соответствии с Приказом Департамента здравоохранения города Москвы от 21.12.2022 № 1196 «Об утверждении государственных заданий, финансовое

обеспечение которых осуществляется за счёт средств бюджета города Москвы, государственным бюджетным (автономным) учреждением, подведомственным Департаменту здравоохранения города Москвы, на 2023 год и плановый период 2024 и 2025 годов».

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства 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 распределён следующим образом: С.Ю. Заюнчковский — написание рукописи статьи, структурирование и анализ полученных результатов, библиография; С.А. Коновалов — написание рукописи статьи, анализ результатов опроса; В.В. Зинченко — структурирование и анализ полученных результатов, написание рукописи статьи; Д.Е. Шарова — формирование гипотезы исследования, разработка формы опросника; Е.С. Ахмад — анализ полученных результатов, рецензирование рукописи; А.В. Владимирский — рецензирование рукописи статьи, общее руководство.

ADDITIONAL INFORMATION

Funding source. This article was prepared by a group of authors as a part of the research and development effort titled "Theoretical and methodological framework for digital transformation in radiology" (USIS No. 123031400118-0) in accordance with the Order No. 1196 by the Moscow Health Care Department dated December 21, 2022 "On approval of state assignments funded by means of allocations from the budget of the city of Moscow to the state budgetary (autonomous) institutions subordinate to the Moscow Health Care Department, for 2023 and the planned period of 2024 and 2025".

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work. S.Yu. Zayunchkovsky — writing the manuscript, structuring and analyzing the obtained results, a bibliography; S.A. Konovalov — writing the manuscript, analyzing the survey results; V.V. Zinchenko — structuring and analyzing the obtained results, writing the manuscript; D.E. Sharova — generating a research hypothesis, developing a questionnaire; E.S. Ahmad — analyzing the obtained results, reviewing the manuscript; A.V. Vladimirsky — reviewing the manuscript, the overall guidance.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайлов Ю.И. Управление процессами в системе менеджмента качества предприятия // Дискурс. 2017. № 6. С. 51–57.
2. Зиновьева Е.В., Сапунова А.В., Иванов И.В. Безопасность обращения медицинских изделий на всех этапах их жизненно-

го цикла // Общественное здоровье. 2022. Т. 2, № 3. С. 16–24. doi: 10.21045/2782-1676-2021-2-3-16-24

3. Regulation (EU) 2017/745 of the European Parliament and of the Council of 5 April 2017 on medical devices, amending Directive

2001/83/EC, Regulation (EC) No 178/2002 and Regulation (EC) No 1223/2009 and repealing Council Directives 90/385/EEC and 93/42/EEC // Official J Eur Union. Режим доступа: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32017R0745>. Дата обращения: 15.07.2023.

4. Lim K., Heo T.Y., Yun J. Trends in the approval and quality management of artificial intelligence medical devices in the

Republic of Korea // *Diagnostics (Basel)*. 2022. Vol. 12, N 2. P. 355. doi: 10.3390/diagnostics12020355

5. Гусев А.В., Владзимирский А.В., Шарова Д.Е., и др. Развитие исследований и разработок в сфере технологий искусственного интеллекта для здравоохранения в Российской Федерации: итоги 2021 года // *Digital Diagnostics*. 2022. Т. 3, № 3. С. 178–194. doi: 10.17816/DD107367

REFERENCES

1. Mikhailov Yul. Process management in the quality management system of the enterprise. *Discourse*. 2017;(6):51–57. (In Russ).
2. Zinovieva EV, Sapunova AV, Ivanov IV. Safety of circulation of medical devices at all stages of their life cycle. *Public health*. 2022;2(3):16–24. (In Russ). doi: 10.21045/2782-1676-2021-2-3-16-24
3. Regulation (EU) 2017/745 of the European Parliament and of the Council of 5 April 2017 on medical devices, amending Directive 2001/83/EC, Regulation (EC) No 178/2002 and Regulation (EC) No 1223/2009 and repealing Council Directives 90/385/EEC and 93/42/EEC // Official J Eur Union. Available from: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32017R0745>. Accessed: 15.07.2023.

eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32017R0745. Accessed: 15.07.2023.

4. Lim K, Heo TY, Yun J. Trends in the approval and quality management of artificial intelligence medical devices in the Republic of Korea. *Diagnostics (Basel)*. 2022;12(2):355. doi: 10.3390/diagnostics12020355
5. Gusev AV, Vladzimirsky AV, Sharova DE, et al. Development of research and development in the field of artificial intelligence technologies for healthcare in the Russian Federation: Results of 2021. *Digital Diagnostics*. 2022;3(3):178–194. (In Russ). doi: 10.17816/DD107367

ОБ АВТОРАХ

* **Зинченко Виктория Валерьевна;**

адрес: Россия, 127051, Москва, ул. Петровка, д. 24, стр. 1;

ORCID: 0000-0002-2307-725X;

eLibrary SPIN: 4188-0635;

e-mail: ZinchenkoVV1@zdrav.mos.ru

Заюнчковский Сергей Юрьевич;

ORCID: 0009-0002-7463-7699;

e-mail: ZayunchkovskijSY@zdrav.mos.ru

Коновалов Сергей Анатольевич;

ORCID: 0009-0003-0011-3371;

e-mail: KonovalovSA4@zdrav.mos.ru

Шарова Дарья Евгеньевна;

ORCID: 0000-0001-5792-3912;

eLibrary SPIN: 1811-7595;

e-mail: SharovaDE@zdrav.mos.ru

Ахмад Екатерина Сергеевна;

ORCID: 0000-0002-8235-9361;

eLibrary SPIN: 5891-4384;

e-mail: AkhmadES@zdrav.mos.ru

Владзимирский Антон Вячеславович, д-р мед. наук;

ORCID: 0000-0002-2990-7736;

eLibrary SPIN: 3602-7120;

e-mail: npcmmr@zdrav.mos.ru

AUTHORS' INFO

* **Viktoria V. Zinchenko;**

address: 24/1 Petrovka street, 127051 Moscow, Russia;

ORCID: 0000-0002-2307-725X;

eLibrary SPIN: 4188-0635;

e-mail: ZinchenkoVV1@zdrav.mos.ru

Sergey Yu. Zayunchkovskiy;

ORCID: 0009-0002-7463-7699;

e-mail: ZayunchkovskijSY@zdrav.mos.ru

Sergey A. Konovalov;

ORCID: 0009-0003-0011-3371;

e-mail: KonovalovSA4@zdrav.mos.ru

Daria E. Sharova;

ORCID: 0000-0001-5792-3912;

eLibrary SPIN: 1811-7595;

e-mail: SharovaDE@zdrav.mos.ru

Ekaterina S. Akhmad;

ORCID: 0000-0002-8235-9361;

eLibrary SPIN: 5891-4384;

e-mail: AkhmadES@zdrav.mos.ru

Anton V. Vladzimirskyy, MD, Dr. Sci. (Med.);

ORCID: 0000-0002-2990-7736;

eLibrary SPIN: 3602-7120;

e-mail: npcmmr@zdrav.mos.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD569112>

Ошибка в статье «Сравнение измерения линейного размера и объёма лёгочных очагов по данным скрининга рака лёгких с помощью низкодозной компьютерной томографии» (doi: 10.17816/DD117481)

М.М. Сучилова¹, И.А. Блохин¹, О.О. Алешина², В.А. Гомболевский³, Р.В. Решетников¹,
В.Ю. Босин¹, О.В. Омелянская¹, А.В. Владзимирский^{1, 4}

¹ Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий, Москва, Российская Федерация;

² Государственная клиническая больница № 13, Москва, Российская Федерация;

³ Институт искусственного интеллекта, Москва, Российская Федерация;

⁴ Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова (Сеченовский Университет), Москва, Российская Федерация

В статье «Сравнение измерения линейного размера и объёма лёгочных очагов по данным скрининга рака лёгких с помощью низкодозной компьютерной томографии», опубликованной в Т. 4, № 1 журнала Digital Diagnostics за 2023 год (doi: 10.17816/DD117481), была допущена ошибка в указании источника финансирования проведенного исследования. По просьбе авторского коллектива ошибка в указании источника финансирования была устранена, исходная версия опубликованной статьи заменена издательством на исправленную, информация на сайте также была скорректирована. Верный текст раздела об источниках финансирования проведенного исследования: Данная статья подготовлена авторским коллективом в рамках научно-исследовательской работы (№ ЕГИСУ: 123031400009-1) в соответствии с Приказом Департамента здравоохранения города Москвы от 21.12.2022 г. № 1196.

Авторы и издатель приносят извинения читателям за допущенную ошибку и выражают уверенность в том, что эта ошибка не могла существенно повлиять на восприятие и интерпретацию результатов исследования, описываемого в тексте произведения.

Ключевые слова: ошибка, erratum, corrigendum, компьютерная томография; скрининг рака лёгкого; лёгочные узлы.

Как цитировать:

Сучилова М.М., Блохин И.А., Алешина О.О., Гомболевский В.А., Решетников Р.В., Босин В.Ю., Омелянская О.В., Владзимирский А.В. Ошибка в статье «Сравнение измерения линейного размера и объёма лёгочных очагов по данным скрининга рака лёгких с помощью низкодозной компьютерной томографии» (doi: 10.17816/DD117481) // *Digital Diagnostics*. 2023. Т. 4, № 3. С. 448–450. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD569112>

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD569112>

Erratum in “Volumetry versus linear diameter lung nodule measurement: an ultra-low-dose computed tomography lung cancer screening study” (doi: 10.17816/DD117481)

Maria M. Suchilova¹, Ivan A. Blokhin¹, Olga O. Aleshina², Victor A. Gomboleviskiy³,
Roman V. Reshetnikov¹, Viktor Yu. Bosin¹, Olga V. Omelyanskaya¹, Anton V. Vladzemyrskyy^{1, 4}

¹ Moscow Center for Diagnostics and Telemedicine, Moscow, Russian Federation;

² City Clinical Hospital No 13, Moscow, Russian Federation;

³ Artificial Intelligence Research Institute, Moscow, Russian Federation;

⁴ The First Sechenov Moscow State Medical University (Sechenov University), Moscow, Russian Federation

In the article "Volumetry versus linear diameter lung nodule measurement: an ultra-low-dose computed tomography lung cancer screening study" published in Digital Diagnostics journal Volume 4 Issue 1 in 2023 (doi: 10.17816/DD117481) contained an error in the paragraph with data of funding sources for the study.

At the request of the authors' team, the error was eliminated, the original version of the published article and the information on the journal's site was replaced with the corrected one.

Correct text of the changed: This paper was prepared by a group of authors as part of the research work (USIS No. 123031400009-1) in accordance with the Order issued by the Moscow Health Care Department No. 1196 dated December 21, 2022.

The authors and the publisher apologize to readers for the published error and express their confidence that this mistake could not significantly affect the perception and interpretation of the results of the study described in the text of the article.

Keywords: erratum; tomography X-Ray compute; early detection of cancer; lung neoplasms.

To cite this article:

Suchilova MM, Blokhin IA, Aleshina OO, Gomboleviskiy VA, Reshetnikov RV, Bosin VYu, Omelyanskaya OV, Vladzemyrskyy AV. Erratum in "Volumetry versus linear diameter lung nodule measurement: an ultra-low-dose computed tomography lung cancer screening study" (doi: 10.17816/DD117481). *Digital Diagnostics*. 2023;4(3):448–450. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD569112>

Received: 06.09.2023

Accepted: 11.09.2023

Published: 12.09.2023

ОБ АВТОРАХ

*** Сучилова Мария Максимовна;**

адрес: Россия, 127051, Москва, ул. Петровка, д. 24, стр. 1;
ORCID: 0000-0003-1117-0294;
eLibrary SPIN: 4922-1894;
e-mail: m.suchilova@npcmr.ru

Блохин Иван Андреевич;

ORCID: 0000-0002-2681-9378;
eLibrary SPIN: 3306-1387;
e-mail: i.blokhin@npcmr.ru

Алёшина Ольга Олеговна;

ORCID: 0000-0001-9924-0204;
eLibrary SPIN: 6004-2422;
e-mail: olya.aleshina.tula@gmail.com

Гомболевский Виктор Александрович, канд. мед. наук;

ORCID: 0000-0003-1816-1315;
eLibrary SPIN: 6810-3279;
e-mail: gombolevskiy@npcmr.ru

Решетников Роман Владимирович, канд. физ.-мат. наук;

ORCID: 0000-0002-9661-0254;
eLibrary SPIN: 8592-0558;
e-mail: reshetnikov@fbb.msu.ru

Босин Виктор Юрьевич, докт. мед. наук;

ORCID: 0000-0002-4619-2744;
eLibrary SPIN: 3380-7889;
e-mail: bosin@npcmr.ru

Омелянская Ольга Васильевна;

ORCID: 0000-0002-0245-4431;
eLibrary SPIN: 8948-6152;
e-mail: o.omelyanskaya@npcmr.ru

Владимирский Антон Вячеславович, докт. мед. наук;

ORCID: 0000-0002-2990-7736;
eLibrary SPIN: 3602-7120;
e-mail: a.vladzimirskiy@npcmr.ru

AUTHORS' INFO

*** Maria M. Suchilova, MD;**

address: 24 Bld. 1, Petrovka st., 127051, Moscow, Russia;
ORCID: 0000-0003-1117-0294;
eLibrary SPIN: 4922-1894;
e-mail: m.suchilova@npcmr.ru

Ivan A. Blokhin, MD;

ORCID: 0000-0002-2681-9378;
eLibrary SPIN: 3306-1387;
e-mail: i.blokhin@npcmr.ru

Olga O. Aleshina, MD;

ORCID: 0000-0001-9924-0204;
eLibrary SPIN: 6004-2422;
e-mail: olya.aleshina.tula@gmail.com

Victor A. Gombolevskiy, MD, Cand. Sci. (Med);

ORCID: 0000-0003-1816-1315;
eLibrary SPIN: 6810-3279;
e-mail: gombolevskiy@npcmr.ru

Roman V. Reshetnikov, Cand. Sci. (Phys.-Math.);

ORCID: 0000-0002-9661-0254;
eLibrary SPIN: 8592-0558;
e-mail: reshetnikov@fbb.msu.ru

Viktor Yu. Bosin, MD, Dr. Sci. (Med.);

ORCID: 0000-0002-4619-2744;
eLibrary SPIN: 3380-7889;
e-mail: bosin@npcmr.ru

Olga V. Omelyanskaya;

ORCID: 0000-0002-0245-4431;
eLibrary SPIN: 8948-6152;
e-mail: o.omelyanskaya@npcmr.ru

Anton V. Vladzimirskyy, MD, Dr. Sci (Med.);

ORCID: 0000-0002-2990-7736;
eLibrary SPIN: 3602-7120;
e-mail: a.vladzimirskiy@npcmr.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author