



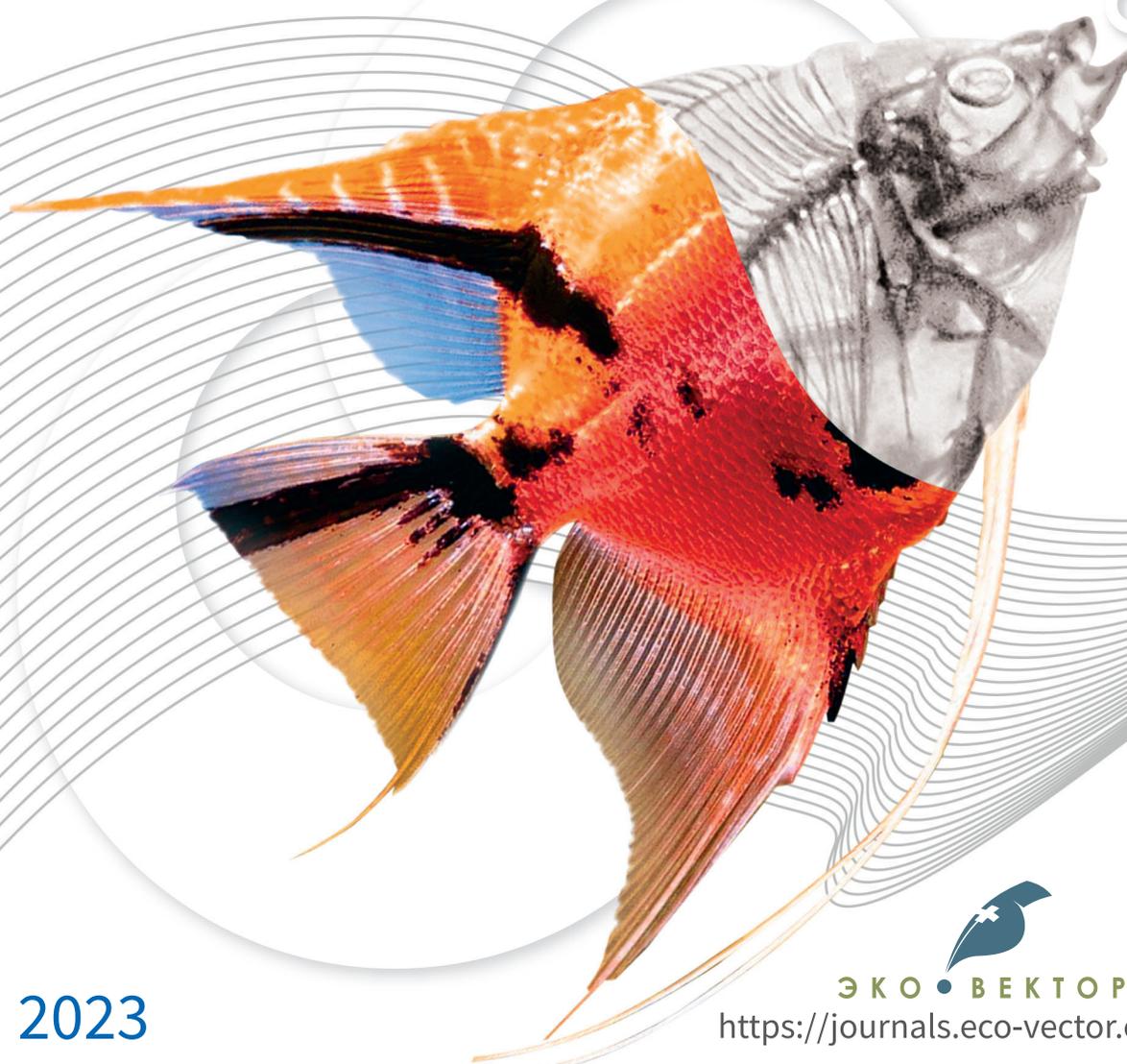
ЦЕНТР ДИАГНОСТИКИ
И ТЕЛЕМЕДИЦИНЫ

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

DIGITAL DIAGNOSTICS

Рецензируемый научный медицинский журнал

4 Том | Volume 2 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.ppressa-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 29.06.2023.

Подписано в печать 07.07.2023. Формат 60 × 88½.

Печать офсетная. Печ. л. 20,25. Усл. печ. л. 18,8.

Уч.-изд. л. 11,0. Тираж 5000 экз.

Цена свободная.

Отпечатано в ООО «Типография Фурсова».

196105, Санкт-Петербург, ул. Благодатная, 69.

Тел.: +7 (812) 646-33-77

16+

© ООО «Эко-Вектор», 2023

ISSN 2712-8490 (Print)

ISSN 2712-8962 (Online)

Digital Diagnostics

Том 4 | Выпуск 2 | 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

Юрий Александрович Васильев, 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

Андрейченко А.Е., к.ф.-м.н. (Москва, Россия)

ORCID: 0000-0001-6359-0763

Berlin L., профессор (Иллинойс, США)

ORCID: 0000-0002-0717-0307

Беляев М.Г., к.ф.-м.н. (Москва, Россия)

ORCID: 0000-0001-9906-6463

Важенни 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

Гомбелевский 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 B., 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)

ORCID: 0000-0002-9102-4176

Mannelli L., MD (Нью-Йорк, США)

ORCID: 0000-0002-9102-4176

Матвеев И.А., д.т.н. (Москва, Россия)

ORCID: 0000-0003-2005-9467

Маццеплишвили 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

Омелянская 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

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

Белеский 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

Коблякова О.С., д.м.н., профессор (Москва, Россия)

ORCID: 0000-0003-0098-7403

Кремнева Е.И., к.м.н. (Москва, Россия)

ORCID: 0000-0001-7936-6063

Петриков С.С., д.м.н., профессор (Москва, Россия)

ORCID: 0000-0003-3292-8789

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 2 | 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

A.E. Andreychenko, PhD (Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0001-6359-0763

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. Gombolevskiy, 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

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

ORCID: 0000-0003-1959-9618

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

ORCID: 0000-0002-5670-167X

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, Assoc. 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.O. Rumyantsev, MD, Dr.Sci. (Med) (Moscow, Russia)

ORCID: 0000-0002-7721-634X

A.E. Khramov, Dr.Sci. (Phys-Math), Professor (St-Petersburg, Russia)

ORCID: 0000-0003-2787-2530

A.A. Anshel's, 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

D.N. Protzenko, 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

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.

16+

© Eco-Vector, 2023



СОДЕРЖАНИЕ

ОРИГИНАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

- Ю.А. Васильев, И.А. Тыров, А.В. Владзимирский, К.М. Арзамасов, И.М. Шулькин, Д.Д. Кожихина, Л.Д. Пестренин*
Двойной просмотр результатов маммографии с применением технологий искусственного интеллекта:
новая модель организации массовых профилактических исследований 93
- В.Ю. Чернина, М.Г. Беляев, А.Ю. Силин, И.О. Аветисов, И.А. Пятницкий, Е.А. Петраш,
М.В. Басова, В.Е. Сеницын, В.В. Омеляновский, В.А. Гомболевский*
Диагностическая и экономическая оценка применения комплексного алгоритма
искусственного интеллекта, направленного на выявление десяти патологических находок
по данным компьютерной томографии органов грудной клетки 105

НАБОРЫ ДАННЫХ

- Т.М. Газашвили, Д.В. Дроздов, Д.В. Шутов, А.С. Шкода*
Создание набора данных с диспозицией и транспозицией наложения
электрокардиографических электродов при записи электрокардиограммы в 12 отведениях 133

ТЕХНИЧЕСКИЕ ОТЧЁТЫ

- С.А. Рьжкин, Ю.В. Дружинина, З.А. Лантух, И.В. Солдатов, В.Н. Лесняк, Д.П. Лебедев,
Д.Н. Самочатов, М.П. Семенова, В.А. Сухов, С.Е. Охрименко*
Проблемы облучения персонала в современных медицинских технологиях 142

СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ОБЗОРЫ

- Д.А. Филатова, Е.А. Мершина, В.Е. Сеницын*
Поражение сердца при COVID-19: вопросы патогенеза и диагностики 156
- А.В. Водоватов, О.А. Гольченко, И.А. Мащенко, Д.В. Алексеева, Л.А. Чипига,
И.В. Хуторной, П.В. Козлова, Г.Е. Труфанов, П.С. Дружинина, С.А. Рьжков, И.В. Солдатов*
Оценка поглощённых доз в плоде у беременных при компьютерной томографии: систематический обзор 170

НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ

- Н.Д. Кудрявцев, К.А. Бардасова, А.Н. Хоружая*
Технология распознавания речи в лучевой диагностике 185
- М.В. Онойко, Е.А. Мершина, О.А. Георгинова, М.Л. Плотникова, А.В. Панюкова, В.Е. Сеницын*
Роль двухэнергетической компьютерной томографии в диагностике подагры
и других кристаллических артропатий: обзор литературы 197

КЛИНИЧЕСКИЕ СЛУЧАИ

- Н.В. Нуднов, С.В. Ивашина, С.П. Аксенова*
Лучевые методы в диагностике первичной и рецидивной злокачественной струмы яичников:
клинический случай 214
- А.В. Панюкова, В.Е. Сеницын, Е.А. Мершина, Н.А. Ручьёва*
Мальформация Абернети: клинический случай 226

РЕДАКЦИОННЫЕ СТАТЬИ

- И.А. Блохин, М.Р. Коденко, Ю.Ф. Шумская, А.П. Гончар, Р.В. Решетников*
Проверка гипотез исследования с использованием языка R 238

CONTENTS

ORIGINAL STUDY ARTICLES

Yuriy A. Vasilev, Ilya A. Tyrov, Anton V. Vladzomyrskyy, Kirill M. Arzamasov, Igor M. Shulkin, Daria D. Kozhikhina, Lev D. Pestrenin

Double-reading mammograms using artificial intelligence technologies:
A new model of mass preventive examination organization 93

Valeria Yu. Chernina, Mikhail G. Belyaev, Anton Yu. Silin, Ivan O. Avetisov, Ilya A. Pyatnitskiy,

Ekaterina A. Petrash, Maria V. Basova, Valentin E. Sinitsyn, Vitaly V. Omelyanovskiy, Victor A. Gombolevskiy

Analysis of the diagnostic and economic impact of the combined artificial intelligence algorithm
for analysis of 10 pathological findings on chest computed tomography. 105

DATASETS

Tamara M. Gazashvili, Dmitry V. Drozdov, Dmitry V. Shutov, Andrey S. Shkoda

Creation of a training and test dataset with the disposition and transposition
of overlaying electrocardiographic electrodes when recording electrocardiograms-12 133

TECHNICAL REPORTS

Sergey A. Ryzhkin, Yuliya V. Druzhinina, Zoya A. Lantuh, Ilya V. Soldatov, Viktor N. Lesnyak,

Dmitriy P. Lebedev, Denis N. Samochatov, Maria P. Semenova, Vitaly A. Sukhov, Sergey E. Okhrimenko

Problems of personnel irradiation in modern medical technologies. 142

SYSTEMATIC REVIEWS

Daria A. Filatova, Elena A. Mershina, Valentin E. Sinitsyn

COVID-19-related cardiac lesion: The questions of pathogenesis and diagnostics 156

Alexander V. Vodovatov, Olga A. Golchenko, Irina A. Mashchenko, Daria V. Alekseeva, Larisa A. Chipiga,

Ivan V. Khutornoy, Polina V. Kozlova, Gennady E. Trufanov, Polina S. Druzhinina, Sergey A. Ryzhov, Ilya V. Soldatov

Evaluation of fetal absorbed doses from computed tomography examinations of pregnant patients:

A systematic review 170

REVIEWS

Nikita D. Kudryavtsev, Kristina A. Bardasova, Anna N. Khoruzhaya

Speech recognition technology in radiology 185

Maria V. Onoyko, Elena A. Mershina, Olga A. Georjina, Maria L. Plotnikova, Aleksandra V. Panyukova, Valentin E. Sinitsyn

The role of dual-energy computed tomography in the diagnosis of gout and other crystalline arthropathies: A review. ... 197

CASE REPORTS

Nikolai V. Nudnov, Svetlana V. Ivashina, Svetlana P. Aksenova

Radiation methods in the diagnosis of primary and recurrent malignant ovarian struma: A case report 214

Alexandra V. Panyukova, Valentin E. Sinitsyn, Elena A. Mershina, Natalia A. Rucheva

Abernethy malformation: A case report 226

EDITORIALS

Ivan A. Blokhin, Maria R. Kodenko, Yuliya F. Shumskaya, Anna P. Gonchar, Roman V. Reshetnikov

Hypothesis testing using R. 238

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD321423>

Двойной просмотр результатов маммографии с применением технологий искусственного интеллекта: новая модель организации массовых профилактических исследований

Ю.А. Васильев¹, И.А. Тыров², А.В. Владзимирский¹, К.М. Арзамасов¹,
И.М. Шулькин¹, Д.Д. Кожихина¹, Л.Д. Пестренин¹

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

² Департамент здравоохранения города Москвы, Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Доступность наборов медицинских данных и технологий разработки программного обеспечения на основе искусственного интеллекта в последние годы привела к увеличению количества решений для медицинской диагностики и маммографии в частности. Это программное обеспечение, зарегистрированное как медицинское изделие, может быть использовано для описания цифровых маммографий, что позволит в значительной мере сэкономить временные, материальные и кадровые ресурсы в здравоохранении при гарантированном сохранении качества профилактических исследований молочных желёз.

Цель — обосновать возможность и эффективность применения программного обеспечения на основе технологий искусственного интеллекта для первой интерпретации цифровых маммограмм при сохранении практики второго описания рентгеновских изображений врачом-рентгенологом.

Материалы и методы. Набор данных из 100 цифровых маммографических исследований, из них 50 — «Отсутствие целевой патологии», 50 — «Присутствие целевой патологии» (с признаками злокачественных новообразований), был обработан программным обеспечением на основе технологий искусственного интеллекта, зарегистрированным в Российской Федерации как медицинское изделие. Выполнен ROC-анализ. Ограничения исследования: значения метрик диагностической точности получены для версий программного обеспечения на основе технологий искусственного интеллекта, актуальных на конец 2022 года.

Результаты. При настройке на 80,0% чувствительность специфичность искусственного интеллекта составила 90,0% (95% ДИ 81,7–98,3), точность — 85,0% (95% ДИ 78,0–92,0). При настройке на 100% специфичность искусственный интеллект показал чувствительность 56,0% (95% ДИ 42,2–69,8), точность — 78,0% (95% ДИ 69,9–86,1). При настройке на 100% чувствительность специфичность искусственного интеллекта составила 54,0% (95% ДИ 40,2–67,8), точность — 77,0% (95% ДИ 68,8–85,2). Предложены два подхода, предусматривающие автономную первую интерпретацию цифровой маммографии посредством искусственного интеллекта. Первый подход заключается в оценке рентгеновского изображения с помощью искусственного интеллекта с более высокой чувствительностью, чем у двойного описания маммографии врачами-рентгенологами, при сопоставимом уровне специфичности. Второй подход подразумевает, что программное обеспечение на основе технологий искусственного интеллекта будет определять категорию маммографии («Отсутствие целевой патологии» или «Присутствие целевой патологии») с указанием степени своей «уверенности» в полученном результате в зависимости от «коридора», в который попадает предсказанное значение.

Заключение. Оба предложенных сценария использования программного обеспечения на основе технологий искусственного интеллекта с целью автономного первого описания цифровых маммограмм способны обеспечить качество диагностики, не уступающее двойному описанию снимков врачами-рентгенологами и даже превышающее его. Экономическая выгода от практической реализации данного подхода в масштабах страны может составлять от 0,6 до 5,5 млрд рублей ежегодно.

Ключевые слова: профилактические исследования; маммография; искусственный интеллект; диагностическая точность.

Как цитировать

Васильев Ю.А., Тыров И.А., Владзимирский А.В., Арзамасов К.М., Шулькин И.М., Кожихина Д.Д., Пестренин Л.Д. Двойной просмотр результатов маммографии с применением технологий искусственного интеллекта: новая модель организации массовых профилактических исследований // *Digital Diagnostics*. 2023. Т. 4, № 2. С. 93–104. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD321423>

Рукопись получена: 17.03.2023

Рукопись одобрена: 25.04.2023

Опубликована: 25.05.2023

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD321423>

Double-reading mammograms using artificial intelligence technologies: A new model of mass preventive examination organization

Yuriy A. Vasilev¹, Ilya A. Tyrov², Anton V. Vladzimirskyy¹, Kirill M. Arzamasov¹, Igor M. Shulkin¹, Daria D. Kozhikhina¹, Lev D. Pestrenin¹

¹ Moscow Center for Diagnostics and Telemedicine, Moscow, Russian Federation

² Moscow Health Care Department, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: In recent years, the availability of medical datasets and technologies for software development based on artificial intelligence technology has resulted in a growth in the number of solutions for medical diagnostics, particularly mammography. Registered as a medical device, this program can interpret digital mammography, significantly saving time, material, and human resources in healthcare while ensuring the quality of mammary gland preventive studies.

AIM: This study aims to justify the possibility and effectiveness of artificial intelligence-based software for the first interpretation of digital mammograms while maintaining the practice of a radiologist's second description of X-ray images.

MATERIALS AND METHODS: A dataset of 100 digital mammography studies (50 — “absence of target pathology” and 50 — “presence of target pathology,” with signs of malignant neoplasms) was processed by software based on artificial intelligence technology that was registered as a medical device in the Russian Federation. Receiver operating characteristic analysis was performed. Limitations of the study include the values of diagnostic accuracy metrics obtained for software based on artificial intelligence technology versions, relevant at the end of 2022.

RESULTS: When set to 80.0% sensitivity, artificial intelligence specificity was 90.0% (95% CI, 81.7–98.3), and accuracy was 85.0% (95% CI, 78.0–92.0). When set to 100% specificity, artificial intelligence demonstrated 56.0% sensitivity (95% CI, 42.2–69.8) and 78.0% accuracy (95% CI, 69.9–86.1). When the sensitivity was set to 100%, the artificial intelligence specificity was 54.0% (95% CI, 40.2–67.8), and the accuracy was 77.0% (95% CI, 68.8–85.2). Two approaches have been proposed, providing an autonomous first interpretation of digital mammography using artificial intelligence. The first approach is to evaluate the X-ray image using artificial intelligence with a higher sensitivity than that of the double-reading mammogram by radiologists, with a comparable level of specificity. The second approach implies that artificial intelligence-based software will determine the mammogram category (“absence of target pathology” or “presence of target pathology”), indicating the degree of “confidence” in the obtained result, depending on the corridor into which the predicted value falls.

CONCLUSIONS: Both proposed approaches for using artificial intelligence-based software for the autonomous first interpretation of digital mammograms can provide diagnostic quality comparable to, if not superior to, double-image reading by radiologists. The economic benefit from the practical implementation of this approach nationwide can range from 0.6 to 5.5 billion rubles annually.

Keywords: artificial intelligence; diagnostic accuracy; mammography; preventive medicine.

To cite this article

Vasilev YuA, Tyrov IA, Vladzimirskyy AV, Arzamasov KM, Shulkin IM, Kozhikhina DD, Pestrenin LD. Double-reading mammograms using artificial intelligence technologies: A new model of mass preventive examination organization. *Digital Diagnostics*. 2023;4(2):93–104. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD321423>

Received: 17.03.2023

Accepted: 25.04.2023

Published: 25.05.2023

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD321423>

使用人工智能对乳腺X线摄影结果进行两次查看：一种组织大规模预防性研究的新模式

Yuriy A. Vasilev¹, Ilya A. Tyrov², Anton V. Vladzimirskyy¹, Kirill M. Arzamasov¹, Igor M. Shulkin¹, Daria D. Kozhikhina¹, Lev D. Pestrenin¹

¹ Moscow Center for Diagnostics and Telemedicine, Moscow, Russian Federation

² Moscow Health Care Department, Moscow, Russian Federation

简评

论证。近年来，医疗数据集和人工智能软件技术开发的可达性，使得医疗诊断，特别是乳腺X线摄影的解决方案激增。这种登记为医疗设备的软件可被用于描述数乳腺X线摄影，这允许提供医疗服务时在很大程度上节省时间、物质和人力的资源，同时确保乳房预防性检查的质量。

该研究的目的是证明使用基于人工智能技术的软件对数字乳房X光照片进行第一次解读的可用性和有效性，同时保持放射科医生对X射线图像进行第二次描述的做法。

材料和方法。我们用在俄罗斯联邦登记为医疗设备的基于人工智能技术的软件处理了100张数字乳房X光照片的数据集，其中50张为“无目标病变”，50张为“存在目标病变”（有恶性肿瘤症状）。进行了ROC分析。研究局限性：诊断准确性度量值是基于人工智能技术的软件版本获得的，是在2022年底有效的。

结果。当设置为80.0%的灵敏度时，人工智能显示出90.0%的特异度（95% CI 81.7–98.3）和85.0%的准确性（95% CI 78.0–92.0）。当设置为100%的特异度时，人工智能显示出56.0%的灵敏度（95% CI 42.2–69.8）和78.0%的准确性（95% CI 69.9–86.1）。当设置为100%灵敏度时，人工智能的特异度为54.0%（95% CI 40.2–67.8），准确性为77.0%（95% CI 68.8–85.2）。提出了两种方法，涉及通过人工智能对数字乳腺X线摄影进行的第一次自主解读。第一种方法是利用人工智能评估X射线图像，其灵敏度高于放射科医生进行的双重乳腺X线摄影描述，特异度水平相当。第二种方法是基于人工智能技术的软件将对乳腺X线摄影进行分类（“无目标病变”或“存在目标病变”），表明其对结果的“信心”程度，取决于预测值所处的“走廊”。

结论。使用基于人工智能技术的软件对数字乳房X光照片进行第一次自主描述的两种提出方案都能提供与放射科医生对图像进行的双重描述相同甚至更高的诊断质量。在全国范围内在实践中实现这种方法的经济效益可能是每年6亿至55亿卢布。

关键词：预防性研究；乳腺X线摄影；人工智能；诊断准确性。

To cite this article

Vasilev YuA, Tyrov IA, Vladzimirskyy AV, Arzamasov KM, Shulkin IM, Kozhikhina DD, Pestrenin LD. 使用人工智能对乳腺X线摄影结果进行两次查看：一种组织大规模预防性研究的新模式. *Digital Diagnostics*. 2023;4(2):93–104. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD321423>

收到: 17.03.2023

接受: 25.04.2023

发布日期: 25.05.2023

ОБОСНОВАНИЕ

Злокачественные новообразования молочной железы представляют собой значимую медицинскую, социально-экономическую и демографическую проблему, будучи ведущей онкологической патологией и лидером в структуре смертности среди женского населения. С 2011 по 2019 год наблюдался устойчивый рост заболеваемости (с 45,24 до 53,34 на 100 тыс. населения соответственно); в 2020 году отмечалось резкое её снижение до 47,39 на 100 тыс. населения с возобновлением роста в 2021 году [1]. Такая динамика объясняется приостановкой программ массовых профилактических осмотров в период пандемии COVID-19. С одной стороны, ситуация полностью обоснованная, с другой — демонстрирует уязвимость системы здравоохранения. Вынужденное перераспределение ресурсов негативно сказалось на скрининге социально значимых заболеваний. Но и вне контекста пандемии своевременность выявления злокачественных новообразований молочных желёз остаётся неудовлетворительной. Крайне высок показатель запущенности: более 27,0% случаев злокачественных новообразований выявляется на поздних (III–IV) стадиях. Обращает на себя внимание положительная тенденция — устойчивый рост индекса накопления контингента больных злокачественными новообразованиями молочных желёз: в 2011 году соответствующий показатель составлял 9,5, в 2021 году — уже 11,9. Это свидетельствует о планомерном улучшении качества и эффективности методов лечения злокачественных новообразований молочных желёз [2].

Таким образом, требуется развитие массовых профилактических исследований как с точки зрения увеличения охвата и вовлечённости населения, производительности, качества, экономической эффективности, так и с позиций формирования устойчивости и бесперебойной доступности. Реализация указанных задач на фоне явного прогресса методов лечения позволит получить принципиально новые результаты в преодолении проблемы злокачественных новообразований молочных желёз.

В настоящее время самый распространённый способ скрининга злокачественных новообразований — рентгеновская маммография.

Действующими нормативно-правовыми актами предусматривается двойной просмотр результатов профилактической маммографии. Это означает, что изображения каждой обследованной пациентки должны быть независимо интерпретированы и описаны двумя врачами-рентгенологами. Целесообразность такого подхода неоднократно подтверждена как отечественными, так и зарубежными авторами. Объединённая частота выявления патологических изменений при двойном просмотре выше. Однократный просмотр по сравнению с двойным снижает чувствительность для всех категорий BI-RADS (Breast Imaging Reporting and Data System — система интерпретации и протоколирования визуализации молочной

железы). Более того, отказ от двойного просмотра несёт разнообразные негативные последствия для обследуемых женщин [3, 4]. Вместе с тем двойной просмотр чреват определёнными негативными аспектами (ресурсоёмкость, качество, несовершенная система финансирования).

Ресурсоёмкость. В условиях первичного звена здравоохранения необходимо задействовать двух врачей-рентгенологов для описания каждого профилактического исследования, при том что подавляющее большинство любых скрининговых исследований относится к категории «Отсутствие целевой патологии». Существует риск сокрытия кадрового дефицита за счёт приписок и иных манипуляций, что, в конечном счёте, негативно сказывается на здоровье женского населения. Вместе с тем реальная потребность в объёме профилактических маммографий и темпы наращивания парка оборудования принципиально превышают все возможности по увеличению количества кадров.

Качество. Интерпретация результатов маммографии требует специальных навыков и фактически является субспециализацией современной рентгенологии. Это только усугубляет проблему кадрового дефицита: «механическое» наращивание числа врачей-рентгенологов не решит проблему качественного и своевременного выявления злокачественных новообразований молочной железы.

Несовершенная система финансирования. Использование двойного тарифа, т.е. последовательная оплата двух услуг применима только в случаях наличия отдельного тарифа на описание результатов маммографии; соответственно, одна услуга включает выполнение и описание маммографии, вторая — только описание. В противоположном случае осуществляется некорректное финансирование (оплачиваются две услуги, включающие как выполнение, так и описание маммографии). Более распространена ситуация недофинансирования медицинских организаций: услуга выполнения и описания оплачивается однократно, второе описание не оплачивается.

Потенциально указанные проблемы могут быть решены за счёт автоматизации — применения технологий искусственного интеллекта (ТИИ) для интерпретации результатов маммографии.

В научной литературе имеются доказательные данные о высоком качестве соответствующих технических решений. Фактически ряд продуктов на основе ТИИ по своей диагностической точности в выявлении определённых рентгенологических признаков идентичен среднестатистическому врачу-рентгенологу. Так, объединённая чувствительность, специфичность и площадь под характеристической кривой составляют для автоматизированного анализа 75,4; 90,6 и 0,89%, для врача-рентгенолога — 73,0; 88,6 и 0,85% (статистически значимые различия отсутствуют) [5]. По данным метаанализа [6], объединённая чувствительность, специфичность и площадь

под характеристической кривой для автоматизированного анализа маммографии составляет 91,4; 91,6 и 94,5% соответственно. Коэффициенты сходства IoU-точности (intersection-over-union) локализации патологических находок, отсегментированных нейросетевой моделью и врачом-рентгенологом, составляют 0,86 и 0,96 соответственно [7]. Однако, на наш взгляд, в контексте скрининга злокачественных новообразований молочной железы ТИИ должны внедряться не просто в качестве дискретных систем поддержки принятия врачебных решений, но в виде автоматизированных процессов.

Цель исследования — обосновать модель организации массовых профилактических исследований методом маммографии с применением технологий искусственного интеллекта.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование выполнено в рамках Эксперимента по использованию инновационных технологий в области компьютерного зрения для анализа медицинских изображений и дальнейшего применения в системе здравоохранения города Москвы (далее — Московский эксперимент), проводимого с 2020 года при поддержке Правительства Москвы (mosmed.ai). Достигнутый уровень точности программного обеспечения (ПО) на основе ТИИ (AUC, площадь под кривой $>0,81$), установленный на основе анализа 61 497 маммографий в течение первого года Московского эксперимента, позволил провести данное исследование [8].

Дизайн исследования

Смешанный (количественный компонент — ретроспективное диагностическое исследование, качественный компонент — аналитическое исследование).

Технологии искусственного интеллекта

Для применения в клинической практике ПО на основе ТИИ должно быть зарегистрировано как медицинское изделие. В Российской Федерации статусом медицинских изделий обладают программные продукты на основе технологий искусственного интеллекта, предназначенные для автоматизированного анализа результатов маммографии, от компаний ООО «Медицинские скрининг-системы» (РЗН 2021/14449), и ООО «Платформа Третье Мнение» (РЗН2022/16534).

В исследовании использовалось медицинское изделие, представляющее собой ПО на основе ТИИ — продукт одной из указанных выше компаний. В рамках научного Московского эксперимента ПО на основе ТИИ было интегрировано в Единый радиологический информационный сервис Единой медицинской информационно-аналитической системы г. Москвы (ЕРИС ЕМИАС). ПО на основе ТИИ принимало на вход цифровую маммографию в формате DICOM, анализировало её и возвращало в качестве ответа

текстовое описание (DICOM SR), изображения с разметкой патологических областей (DICOM SC), вероятности наличия патологии в исследовании в целом. Результаты анализа, выполненного ПО на основе ТИИ, становились доступны в ЕРИС ЕМИАС наравне с исходными результатами исследования. Для исследования использовали значения вероятности патологии (вероятность наличия злокачественного процесса) в исследовании в целом; оценка корректности выставления BI-RADS, а также точности локализации патологических находок в настоящем исследовании не проводилась.

Набор данных

В проведённое нами исследование включено 100 цифровых маммограмм, выполненных в рамках скринингового исследования, из них с патологией — 50. Средний возраст обследованных пациентов составил 63 ± 6 года.

Присвоение исследованиям категорий «Отсутствие целевой патологии» или «Присутствие целевой патологии» происходило на основании консенсуса двух экспертов (врачей-рентгенологов со стажем работы по направлению «Маммография» более 5 лет). Для группы «Присутствие целевой патологии» основным критерием включения в исследование была гистологическая верификация. Для группы «Отсутствие целевой патологии» отличающиеся друг от друга мнения врачей-рентгенологов были критерием исключения. Критериями исключения для обеих групп являлись возраст пациентов менее 18 лет и некачественные исследования (I по шкале PGMI), которые определялись на этапе проведения экспертом разметки при подготовке набора данных.

В качестве целевой патологии рассматривались патологические признаки на маммографии, соответствующие 3, 4 и 5-й категориям BI-RADS — «Присутствие целевой патологии». При классификации исследования «Отсутствие целевой патологии» подразумевалось отсутствие подозрения на злокачественные новообразования молочной железы, т.е. наличие категории BI-RADS 1 или 2.

Распределение исследований по типам в соответствии с классификацией ACR (American College of Radiology) было следующим: в группе «Отсутствие целевой патологии»: А — 26, В — 16, С — 5, D — 3; в группе «Присутствие целевой патологии»: А — 15, В — 24, С — 11, D — 0.

Набор данных сформирован из исследований, выполненных на маммографах FUJIFILM Corporation (Япония). В процессе подготовки набора данных участвовали следующие медицинские организации: Городская поликлиника (ГП) № 22, филиал № 1; Диагностический клинический центр № 1; ГП № 8; ГП № 36; ГП № 22; ГП № 209; Диагностический центр № 3, филиал № 4; Консультативно-диагностическая поликлиника № 121; Клинико-диагностический центр № 4; Городская клиническая больница имени М.П. Кончаловского Департамента здравоохранения города Москвы, Поликлиническое отделение № 3.

Этическая экспертиза

Данное исследование основано на результатах Эксперимента по использованию инновационных технологий в области компьютерного зрения для анализа медицинских изображений и дальнейшего применения в системе здравоохранения г. Москвы, утверждённого этическим комитетом (выписка из протокола № 2 НЭК МРО РОПР от 20.02.2020), также зарегистрированного на ClinicalTrials (NCT04489992).

Статистический анализ

Для обработки полученных данных использовали метод построения и анализа характеристической кривой (ROC-анализ) посредством специально разработанного web-инструмента (<https://roc-analysis.mosmed.ai/>) [9, 10]. Истинные значения были представлены бинарной разметкой исследований (0 — отсутствие патологии, 1 — наличие целевой патологии). Результатом являлась вероятность наличия патологии, определённая ПО на основе ТИИ. Полученные данные в CSV-формате загружали в электронную форму, после чего WEB-инструмент выполнял построение характеристической кривой. В интерактивном режиме определяли пороговые значения, соответствующие самой крайней левой точке с чувствительностью 100% и самой крайней правой экспериментальной точке со специфичностью 100%. В дальнейшем проводился анализ остальных метрик диагностической точности для установленного порогового значения. Для анализа использовали термины классической четырёхпольной таблицы. Истинно положительным считалось верное отнесение маммографии к группе «Присутствие целевой патологии», истинно отрицательным — верное отнесение маммографии к группе «Отсутствие целевой патологии». Ложноположительным считалось ошибочное отнесение маммографии из группы «Отсутствие целевой патологии» к группе «Присутствие целевой патологии», а ложноотрицательным — результат отнесения маммографии из группы «Присутствие целевой патологии» к группе «Отсутствие целевой патологии».

Все статистические показатели, представленные в результатах, рассчитаны с 95% доверительным интервалом (ДИ) методом случайных выборок с возвратом (так называемый бутстреппинг, от англ. bootstrapping) с количеством итераций 1000.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Нами предлагается следующая модель. Исследование «Профилактическая рентгеновская маммография» назначает лечащий врач в соответствии с действующими нормативно-правовыми актами, клиническими

рекомендациями. Непосредственно выполняет исследование рентгенолаборант. Результаты исследования в цифровом виде поступают в архив медицинских изображений в составе медицинской информационной системы медицинской организации и/или информационной системы в сфере здравоохранения субъекта Российской Федерации. Первый просмотр выполняется ПО (медицинским изделием на основе ТИИ, допущенным к обращению в установленном порядке). В результате первого просмотра в информационной системе формируется электронная медицинская запись¹, полученная в автоматическом режиме и содержащая (а) отдельную серию изображений с графической маркировкой и/или температурной картой областей с патологическими изменениями при их наличии; (б) структурированный отчёт, краткое руководство пользователя, заключение, детализацию и вероятность наличия патологических изменений. Второй просмотр выполняется врачом-рентгенологом. В результате второго просмотра в информационной системе формируется электронный медицинский документ — протокол описания и заключение.

Выполнено исследование возможности обеспечения ПО на основе ТИИ требуемого уровня диагностической точности.

Характеристическая кривая, отражающая работу исследуемого ПО на основе ТИИ, представлена на рис. 1.

Распределение маммографий по группам (истинно положительные, истинно отрицательные, ложноотрицательные, ложноположительные) в зависимости от выбранного порогового значения представлено в табл. 1.

При выставлении порогового значения, соответствующего 100,0% специфичности (пороговое значение 0,93), искусственный интеллект корректно определил маммографии из группы «Присутствие целевой патологии», т.е. ложноположительные срабатывания отсутствовали. Из 50 маммографий, которые были в группе «Присутствие целевой патологии», искусственный интеллект при указанной настройке порогов корректно определил 28 (56,0%) исследований. Для таких настроек ПО на основе ТИИ получаем следующие значения метрик диагностической точности: чувствительность 56,0% (95% ДИ 42,2–69,8), специфичность 100,0% (95% ДИ 100,0–100,0), точность 78,0% (95% ДИ 69,9–86,1).

При выставлении порогового значения, соответствующего 100% чувствительности (пороговое значение 0,25), ложноотрицательные результаты отсутствовали, а количество истинно отрицательных составило 27 (54,0% всех исследований группы «Отсутствие целевой патологии»). При такой настройке ПО на основе ТИИ получаем чувствительность 100,0% (95% ДИ

¹ Медицинские записи, полученные в автоматическом режиме в результате применения медицинских изделий, допущенных к обращению, не требуют подписания электронной подписью медицинского работника (в соответствии с Приказом Министерства здравоохранения Российской Федерации от 07.09.2020 N 947н «Об утверждении Порядка организации системы документооборота в сфере охраны здоровья в части ведения медицинской документации в форме электронных документов»).

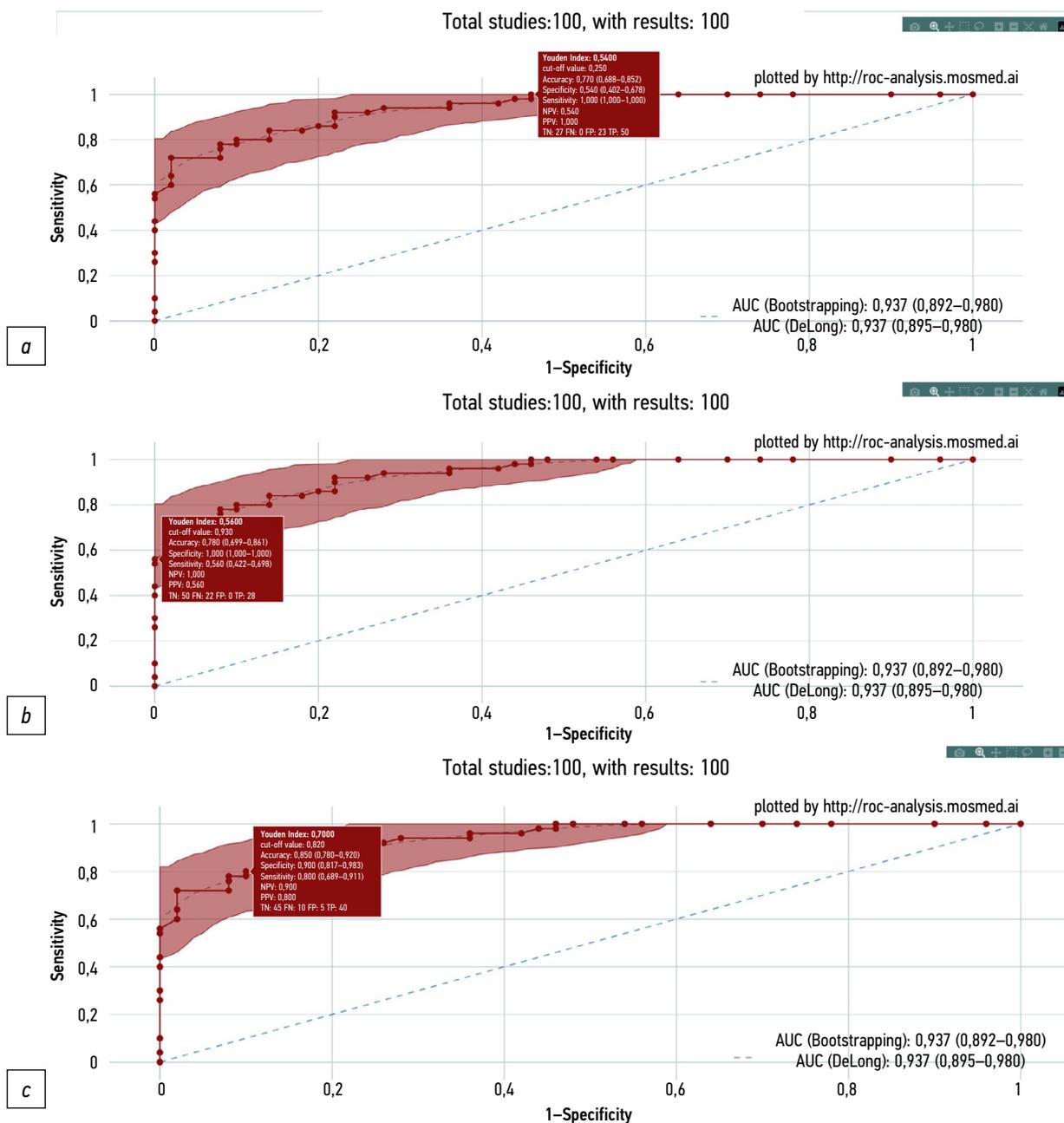


Рис. 1. Характеристическая кривая программного обеспечения на основе технологий искусственного интеллекта. Заливкой показан 95% доверительный интервал. Отдельно выделены экспериментальные значения, соответствующие 100,0% чувствительности (а), 100,0% специфичности (б) и 80,0% чувствительности (с). Для каждой из этих экспериментальных точек в прямоугольнике указаны значения метрик диагностической точности при соответствующем пороговом значении.

Таблица 1. Четырёхполюсная таблица для разных пороговых значений

Группа	Число исследований	Результат	100% чувствительность	100% специфичность	Сбалансированная чувствительность и специфичность
«Присутствие целевой патологии»	50	Истинно положительный	50	28	80,0%**
		Ложноположительный	23	0	
«Отсутствие целевой патологии»	50	Истинно отрицательный	27	50	90,0%*
		Ложноотрицательный	0	22	

Примечание. * Процент истинно отрицательных результатов рассчитан относительно объёма группы «Отсутствие целевой патологии»; ** процент истинно положительных результатов рассчитан относительно объёма группы «Присутствие целевой патологии».

100,0–100,0), специфичность 54,0% (95% ДИ 40,2–67,8), точность 77,0% (95% ДИ 68,8–85,2).

При выставлении порогового значения, руководствуясь методом максимизации индекса Юдена (пороговое значение 0,82), значение чувствительности составило 80,0%, количество истинно отрицательных результатов — 45 (90,0% всех исследований группы «Отсутствие целевой патологии»), а количество истинно положительных — 40 (80,0% всех исследований группы «Присутствие целевой патологии»). При такой настройке ПО на основе ТИИ получаем чувствительность 80,0% (95% ДИ 68,9–91,1), специфичность 90,0% (95% ДИ 81,7–98,3), точность 85,0% (95% ДИ 78,0–92,0).

ОБСУЖДЕНИЕ

Резюме основного результата исследования

Для ПО на основе ТИИ, используемого при реализации услуги «Описание и интерпретация данных маммографического исследования с использованием искусственного интеллекта», выставление разных пороговых значений позволяет установить значения метрик чувствительности, специфичности и точности, соответствующие или превышающие таковые для двойного чтения маммографии врачами-рентгенологами.

Обсуждение основного результата исследования

В Российской Федерации ежегодно выполняется около 8,2 млн профилактических маммографий², двойная оценка которых требует значительного количества временных, кадровых и финансовых ресурсов. Использование ПО на основе ТИИ для первого просмотра маммографий позволит уменьшить вышеуказанные затраты с одновременным сохранением или даже улучшением качества диагностики. Предлагается рассмотреть два подхода к настройке ПО на основе ТИИ для первого просмотра маммографий.

Первый подход предполагает использование ПО на основе ТИИ со сбалансированными значениями чувствительности и специфичности. В нашем случае чувствительность ПО на основе ТИИ составила 80,0%, что превышает чувствительность двойного просмотра маммографий врачами-рентгенологами, определённую в обзорных публикациях (72,0–73,0%) [5, 6]. При этом специфичность работы искусственного интеллекта (90,0%), полученная в ходе нашего исследования, не уступает специфичности работы двух врачей-рентгенологов (88,0–98,0%) [5, 6]. Ожидается также, что ПО на основе ТИИ в сочетании с оценкой одного рентгенолога будет обладать более

высокой общей точностью интерпретации маммографии по сравнению с интерпретацией только одним рентгенологом, что подтверждается рядом научных публикаций [11–13]. Результатом работы ПО на основе ТИИ при данном подходе будет электронная медицинская запись, содержащая заключение о категории изображения («Отсутствие целевой патологии» или «Присутствие целевой патологии»).

Второй подход подразумевает, что ПО на основе ТИИ будет определять категорию изображения («Отсутствие целевой патологии» или «Присутствие целевой патологии») с указанием степени своей «уверенности» в полученном результате. Общая концепция метода представлена на рис. 2.

Как упоминалось в разделе «Результаты», при построении ROC-кривой для ПО на основе ТИИ были определены пороговые значения (cut-off value) для предсказанных значений при 100% чувствительности и 100% специфичности (0,25 и 0,93 соответственно). На основе этих данных предлагается относить предсказанное значение к одному из трёх «коридоров», которые соответствуют разным результатам классификации и разной степени «уверенности» ПО на основе ТИИ в них:

- 1) «зелёный коридор»: предсказанные значения находятся в диапазоне от 0 до 0,25 и соответствуют категории «Отсутствие целевой патологии» с уверенностью 100%;
- 2) «красный коридор»: предсказанные значения находятся в диапазоне от 0,93 до 1,0 и соответствуют категории «Присутствие целевой патологии» с уверенностью 100%;
- 3) «жёлтый коридор»: предсказанные значения находятся в диапазоне от 0,25 до 0,93 включительно и соответствуют категории «Отсутствие целевой патологии» или «Присутствие целевой патологии», но вероятность правильности классификации менее 100%.

Предсказанное значение и цвет «коридора», в который оно попадает, предлагается добавить в описание маммографии, выполненное ПО на основе ТИИ. При наличии этой информации врач-рентгенолог, который описывает изображение с результатами работы ПО на основе ТИИ, будет знать, насколько можно доверять результатам его работы. С одной стороны, это поможет врачу сохранять повышенную бдительность при описании маммографии из «жёлтого коридора», с другой — подобный подход в долгосрочной перспективе может повысить доверие врачей-рентгенологов к результатам работы ПО на основе ТИИ. Это связано с тем, что искусственный интеллект даже при текущем высоком уровне точности пока не способен однозначно правильно классифицировать 100% анализируемых изображений.

² Тюрин И.Е. Отчет за 2020 г. главного внештатного специалиста Минздрава России по лучевой и инструментальной диагностике Тюрина И.Е. [электронный ресурс]. Режим доступа: https://static-0.minzdrav.gov.ru/system/attachments/attaches/000/056/620/original/Отчет_за_2020_год_Тюрин.pdf?1624967722.

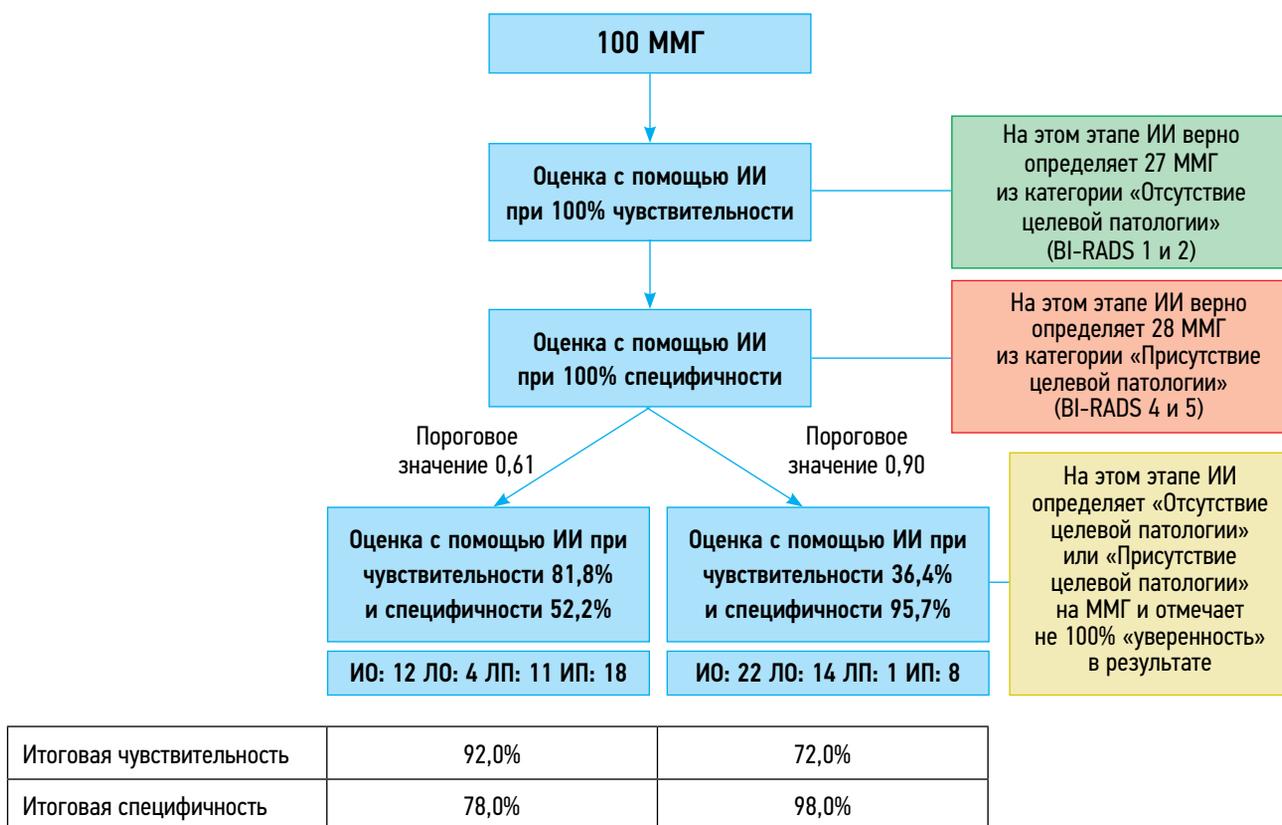


Рис. 2. Концепция подхода к первому описанию маммографии с помощью искусственного интеллекта, в основе которой лежит бинарная классификация изображений с указанием степени «уверенности» программного обеспечения на основе технологий искусственного интеллекта в полученных результатах.

Примечание. ММГ — маммография; ИИ — искусственный интеллект; ИО — истинно отрицательный; ЛО — ложноотрицательный; ЛП — ложноположительный; ИП — истинно положительный.

Преимуществом второго подхода является не только способность искусственного интеллекта отнести часть маммографий к категории «Отсутствие целевой патологии» или «Присутствие целевой патологии» со 100% степенью «уверенности» (зелёный и красный «коридоры» для предсказанных значений), но и возможность изменения порогового значения с целью балансировки чувствительности и специфичности ПО на основе ТИИ для анализа маммографий, попадающих в «жёлтый коридор». В зависимости от клинической задачи можно

установить более высокую чувствительность, которая обеспечит лучшую выявляемость патологии при наименьшем количестве ложноотрицательных результатов или более высокую специфичность для уменьшения количества ложноположительных результатов (табл. 2) [5, 6].

Результаты проведённого исследования демонстрируют возможность автономного применения ПО на основе ТИИ для первого прочтения маммографии, тем не менее в дальнейшем необходимо оптимизировать программное обеспечение для более эффективного выявления «Отсутствия

Таблица 2. Чувствительность и специфичность разных подходов к анализу маммограмм

Анализ результатов профилактической маммографии	Чувствительность, %	Специфичность, %
Двойной просмотр врачами*	72,0–73,0	88,0–98,0
Первый подход с использованием искусственного интеллекта для первого прочтения маммографии (бинарная классификация)	80,0	90,0
Второй подход с использованием искусственного интеллекта для первого прочтения маммографии (бинарная классификация со степенью «уверенности») при пороговом значении 0,61	92,0	78,0
Второй подход с использованием искусственного интеллекта для первого прочтения маммографии (бинарная классификация со степенью «уверенности») при пороговом значении 0,90	72,0	98,0

Примечание. * По литературным данным [5, 6].

целевой патологии» и «Присутствия целевой патологии». Необходимо также отметить, что для настоящего исследования изначально отбирались только качественно выполненные маммографии. Однако современное ПО на основе ТИИ имеет функцию автономного контроля качества маммографии. При практическом внедрении ПО на основе ТИИ может осуществлять кроме клинической оценки результатов маммографии также техническую оценку качества [8].

Экономическое обоснование двойного просмотра результатов маммографии с применением технологий искусственного интеллекта

В рамках исследования проанализированы тарифные соглашения на оплату медицинской помощи, оказываемой по территориальной программе обязательного медицинского страхования, принятые в регионах Российской Федерации на 2023 год.

В 19 субъектах Российской Федерации (22,4% от количества всех субъектов Российской Федерации) отдельно выделена стоимость медицинской услуги «А06.20.004 Маммография», которая проводится в рамках диспансеризации. В 4 субъектах из 19 также определена стоимость медицинской услуги «А06.30.002 Описание и интерпретация рентгенографических изображений (при повторном описании маммографии)». Во всех остальных субъектах Российской Федерации первый этап диспансеризации взрослого населения учитывается комплексной услугой без уточнения стоимости входящей в него маммографии.

Стоимость медицинской услуги по описанию маммографии варьирует от 114,97 до 1034,93 рублей. По состоянию на 01 марта 2023 года медицинская услуга «Описание и интерпретация данных маммографического исследования с использованием искусственного интеллекта» применяется только в рамках Московского эксперимента [8]. Согласно тарифному соглашению на оплату медицинской помощи, оказываемой по территориальной программе обязательного медицинского страхования г. Москвы, стоимость данной медицинской услуги составляет 239,00 рублей³.

В рамках настоящего исследования проанализированы два подхода к определению необходимого размера финансирования скрининговых маммографий в пределах территории Российской Федерации. Первый подход заключался в выполнении расчётов на основе стоимости медицинских услуг в Москве на 2023 год. Стоимость одного описания маммографии врачом-рентгенологом составляет 178,00 рублей. Следовательно, двойное описание каждой маммографии врачами-рентгенологами будет стоить 356,00 рублей. В свою очередь стоимость описания маммографии искусственным интеллектом и врачом-рентгенологом, как было упомянуто выше, составляет

239,00 рублей. Таким образом, при среднем количестве ежегодных маммографий в России 8,2 млн стоимость двойного их описания врачами-рентгенологами составит 2,9 млрд рублей, а стоимость описания искусственным интеллектом и врачом-рентгенологом — 1,9 млрд рублей. Потенциальная экономия средств за счёт использования ПО на основе ТИИ может составить 1,0 млрд рублей ежегодно. Второй подход заключался в выполнении расчётов на основе стоимости медицинских услуг в субъектах Российской Федерации на 2023 год. Учитывался также процент экономии средств при интерпретации маммографии искусственным интеллектом и врачом-рентгенологом по сравнению с двойной интерпретацией врачами-рентгенологами в Москве, который составил

$$\frac{178,00 \times 2 - 239,00}{178,00 \times 2} \times 100\% = 32,8\%.$$

При стоимости медицинской услуги по описанию маммографии врачом-рентгенологом в субъектах Российской Федерации от 114,97 до 1034,93 рублей двойные описания маммографии врачами-рентгенологами стоят от 229,94 до 2069,86 рублей. Предполагая, что интерпретация маммографии искусственным интеллектом и врачом-рентгенологом в субъектах Российской Федерации будет так же, как и в Москве, дешевле двойного описания врачами-рентгенологами на 32,8%, получаем стоимость описания маммографии искусственным интеллектом и врачом-рентгенологом в пределах от 154,51 до 1390,94 рублей. Таким образом, при среднем количестве ежегодных маммографий в России 8,2 млн стоимость двойного описания врачами-рентгенологами составит от 1,8 до 16,9 млрд рублей, а стоимость описания искусственным интеллектом и врачом-рентгенологом — от 1,2 до 11,4 млрд рублей. Потенциальная экономия средств за счёт использования ПО на основе ТИИ на общегосударственном уровне может составить от 0,6 до 5,5 млрд рублей ежегодно.

Ограничения исследования

Значения метрик диагностической точности получены для версий ПО на основе ТИИ, актуальных на конец 2022 года.

Для пациентов группы «Отсутствие целевой патологии» оценка динамики класса по шкале BI-RADS не проводилась, что можно расценивать как ограничение исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана возможность и доказана перспективность применения ТИИ для первого описания маммографических изображений. Медицинское изделие — программное обеспечение на основе ТИИ — обладает чувствительностью

³ Тарифное соглашение на оплату медицинской помощи, оказываемой по Территориальной программе обязательного медицинского страхования города Москвы на 2023 год (Заключено в г. Москве 30.12.2022). Режим доступа: <https://www.consultant.ru/law/review/208575247.html>.

и специфичностью, равными чувствительности и специфичности работы двух врачей-рентгенологов или превосходящими их. Модель применения ПО на основе ТИИ в качестве первого чтения в сочетании со вторым прочтением врачом-рентгенологом позволяет в масштабе всей страны получить экономическую выгоду от реализации в объёме от 0,6 до 5,5 млрд рублей ежегодно.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Источник финансирования. Исследование выполнено в рамках научно-исследовательской работы «Научные методологии устойчивого развития технологий искусственного интеллекта в медицинской диагностике», регистрационный номер ЕГИСУ: 123031500004-5.

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: Ю.А. Васильев, И.А. Тыров — концепция исследования, финальная вычитка текста; А.В. Владимировский — концепция и дизайн исследования, написание и редактирование текста; К.М. Арзамасов — концепция

и дизайн исследования, анализ полученных данных, написание и редактирование текста; И.М. Шулькин — дизайн исследования, сбор и обработка материалов, финальная вычитка текста; Д.Д. Кожихина — дизайн исследования, сбор и обработка материалов; Л.Д. Пестренин — анализ полученных данных, написание текста.

ADDITIONAL INFORMATION

Funding source. This article was prepared by a group of authors as a part of the research and development effort titled “Evidence-based methodologies for sustainable development of artificial intelligence in medical imaging”, registration number to EGISU: 123031500004-5.

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. Yu.A. Vasilev, I.A. Tyrov — research concept, final proofreading of the text; A.V. Vladzimirsky — research concept and design, writing and editing of the text; K.M. Arzamasov — research concept and design, analysis of the data obtained, writing and editing of the text; I.M. Shulkin — research design, collection and processing of materials, final proofreading the text; D.D. Kozhikhina — research design, collection and processing of materials; L.D. Pestrenin — analysis of the data obtained, writing the text.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Злокачественные новообразования в России в 2021 году (заболеваемость и смертность) / под ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского, А.О. Шахзадовой. Москва, 2022. 252 с.
2. Состояние онкологической помощи населению России в 2021 году / под ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского, А.О. Шахзадовой. Москва, 2022. 239 с.
3. Chen Y., James J.J., Michalopoulou E., et al. Performance of radiologists and radiographers in double reading mammograms: The UK national health service breast screening program // *Radiology*. 2023. Vol. 306, N 1. P. 102–109. doi: 10.1148/radiol.212951
4. Euler-Chelpin M.V., Lillholm M., Napolitano G., et al. Screening mammography: Benefit of double reading by breast density // *Breast Cancer Res Treat*. 2018. Vol. 171, N 3. P. 767–776. doi: 10.1007/s10549-018-4864-1
5. Hickman S.E., Woitek R., Le E.P., et al. Machine learning for workflow applications in screening mammography: Systematic review and meta-analysis // *Radiology*. 2022. Vol. 302, N 1. P. 88–104. doi: 10.1148/radiol.2021210391
6. Liu J., Lei J., Ou Y., et al. Mammography diagnosis of breast cancer screening through machine learning: A systematic review and meta-analysis // *Clin Exp Med*. 2022. doi: 10.1007/s10238-022-00895-0
7. Рожкова Н.И., Ройтберг П.Г., Варфоломеева А.А., и др. Сегментационная модель скрининга рака молочной железы на основе нейросетевого анализа рентгеновских изображений // *Сеченовский вестник*. 2020. Т. 11, № 3. С. 4–14. doi: 10.47093/2218-7332.2020.11.3.4-14
8. Компьютерное зрение в лучевой диагностике: первый этап Московского эксперимента. Монография / под ред. Ю.А. Васильева, А.В. Владимировского. Москва: Издательские решения, 2022. 388 с.
9. Патент РФ на изобретение № 2022617324/05.04.2022. Бюл. № 4. Морозов С.П., Андрейченко А.Е., Четвериков С.Ф., и др. Веб-инструмент для выполнения ROC-анализа результатов диагностических тестов. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48373757>. Дата обращения: 10.03.2023.
10. Morozov S.P., Vladzimirsky A.V., Klyashtornyy V.G., et al. Clinical acceptance of software based on artificial intelligence technologies (radiology). Moscow, 2019. 45 p. (Сер. Best practices in medical imaging).
11. Schaffter T., Buist D.S., Lee C.I., et al. Evaluation of combined artificial intelligence and radiologist assessment to interpret screening mammograms // *JAMA Netw Open*. 2020. Vol. 3, N 3. P. e200265. doi: 10.1001/jamanetworkopen.2020.0265
12. Wan Y., Tong Y., Liu Y., et al. Evaluation of the combination of artificial intelligence and radiologist assessments to interpret malignant architectural distortion on mammography // *Front Oncol*. 2022. N 12. P. 880150. doi: 10.3389/fonc.2022.880150
13. Leibig C., Brehmer M., Bunk S., et al. Combining the strengths of radiologists and AI for breast cancer screening: A retrospective analysis // *Lancet Digit Health*. 2022. Vol. 4, N 7. P. e507–e519. doi: 10.1016/S2589-7500(22)00070-X

REFERENCES

1. Malignant neoplasms in Russia in 2021 (morbidity and mortality). Ed by A.D. Kaprin, V.V. Starinsky, A.O. Shahzadova. Moscow; 2022. 252 p. (In Russ).
2. The state of oncological assistance to the population of Russia in 2021. Ed by A.D. Kaprin, V.V. Starinsky, A.O. Shahzadova. Moscow; 2022. 239 p. (In Russ).
3. Chen Y, James JJ, Michalopoulou E, et al. Performance of radiologists and radiographers in double reading mammograms: The UK national health service breast screening program. *Radiology*. 2023;306(1):102–109. doi: 10.1148/radiol.212951
4. Euler-Chelpin MV, Lillholm M, Napolitano G, et al. Screening mammography: Benefit of double reading by breast density. *Breast Cancer Res Treat*. 2018;171(3):767–776. doi: 10.1007/s10549-018-4864-1
5. Hickman SE, Woitek R, Le EP, et al. Machine learning for workflow applications in screening mammography: Systematic review and meta-analysis. *Radiology*. 2022;302(1):88–104. doi: 10.1148/radiol.2021210391
6. Liu J, Lei J, Ou Y, et al. Mammography diagnosis of breast cancer screening through machine learning: A systematic review and meta-analysis. *Clin Exp Med*. 2022. doi: 10.1007/s10238-022-00895-0
7. Rozhkova NI, Rojtbjerg PG, Varfolomeeva AA, et al. Neural network-based segmentation model for breast cancer X-ray screening. *Sechenov medical journal*. 2020;11(3):4–14 (In Russ). doi: 10.47093/2218-7332.2020.11.3.4-14
8. Vasilev JA, Vladzimirskyy AV. Computer vision in radiology: The first stage of the Moscow experiment: Monograph. Moscow: Izdatel'skie resheniya; 2022. 388 p. (In Russ).
9. Patent RUS № 2022617324/05.04.2022. Byul. № 4. Morozov SP, Andreichenko AE, Chetverikov SF, et al. A web-based tool for performing ROC analysis of diagnostic test results. Available from: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48373757>. Accessed: 10.03.2023. (In Russ).
10. Morozov SP, Vladzimirsky AV, Klyashtornyy VG, et al. Clinical acceptance of software based on artificial intelligence technologies (radiology). Moscow; 2019. 45 p. (Ser. Best practices in medical imaging).
11. Schaffter T, Buist DS, Lee CI, et al. Evaluation of combined artificial intelligence and radiologist assessment to interpret screening mammograms. *JAMA Netw Open*. 2020;3(3):e200265. doi: 10.1001/jamanetworkopen.2020.0265
12. Wan Y, Tong Y, Liu Y, et al. Evaluation of the combination of artificial intelligence and radiologist assessments to interpret malignant architectural distortion on mammography. *Front Oncol*. 2022;(12):880150. doi: 10.3389/fonc.2022.880150
13. Leibig C, Brehmer M, Bunk S, et al. Combining the strengths of radiologists and AI for breast cancer screening: A retrospective analysis. *Lancet Digit Health*. 2022;4(7):e507–e519. doi: 10.1016/S2589-7500(22)00070-X

ОБ АВТОРАХ

* **Пестренин Лев Дмитриевич**, мл. науч. сотр.;
адрес: Россия, 127051, Москва, ул. Петровка, д. 24, стр. 1;
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1786-4329>;
eLibrary SPIN: 7193-7706; e-mail: PestreninLD@zdrav.mos.ru

Васильев Юрий Александрович, канд. мед. наук;
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0208-5218>;
eLibrary SPIN: 4458-5608; e-mail: npcmmr@zdrav.mos.ru

Тыров Илья Александрович;
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9337-624X>;
eLibrary SPIN: 8625-3458; e-mail: npcmmr@zdrav.mos.ru

Владзими́рский Антон Вячеславович, д-р мед. наук,
профессор; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2990-7736>;
eLibrary SPIN: 3602-7120; e-mail: npcmmr@zdrav.mos.ru

Арзамасов Кирилл Михайлович, канд. мед. наук;
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7786-0349>;
eLibrary SPIN: 3160-8062; e-mail: ArzamasovKM@zdrav.mos.ru

Шулькин Игорь Михайлович;
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7613-5273>;
eLibrary SPIN: 5266-0618; e-mail: npcmmr@zdrav.mos.ru

Кожихина Дарья Дмитриевна;
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7690-8427>;
eLibrary SPIN: 5869-3854; e-mail: npcmmr@zdrav.mos.ru

AUTHORS' INFO

* **Lev D. Pestrenin**, Junior Research Associate;
address: 24/1 Petrovka street, 127051 Moscow, Russia;
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1786-4329>;
eLibrary SPIN: 7193-7706; e-mail: PestreninLD@zdrav.mos.ru

Yuriy A. Vasilev, MD, Cand. Sci. (Med);
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0208-5218>;
eLibrary SPIN: 4458-5608; e-mail: npcmmr@zdrav.mos.ru

Ilya A. Tyrov;
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9337-624X>;
eLibrary SPIN: 8625-3458; e-mail: npcmmr@zdrav.mos.ru

Anton V. Vladzimirskyy, MD, Dr. Sci. (Med), Professor;
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2990-7736>;
eLibrary SPIN: 3602-7120; e-mail: npcmmr@zdrav.mos.ru

Kirill M. Arzamasov, MD, Cand. Sci. (Med);
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7786-0349>;
eLibrary SPIN: 3160-8062; e-mail: ArzamasovKM@zdrav.mos.ru

Igor M. Shulkin;
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7613-5273>;
eLibrary SPIN: 5266-0618; e-mail: npcmmr@zdrav.mos.ru

Daria D. Kozhikhina;
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7690-8427>;
eLibrary SPIN: 5869-3854; e-mail: npcmmr@zdrav.mos.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD321963>

Диагностическая и экономическая оценка применения комплексного алгоритма искусственного интеллекта, направленного на выявление десяти патологических находок по данным компьютерной томографии органов грудной клетки

В.Ю. Чернина¹, М.Г. Беляев¹, А.Ю. Силин², И.О. Аветисов², И.А. Пятницкий^{1, 10}, Е.А. Петраш^{1, 3}, М.В. Басова¹, В.Е. Синицын^{4, 5}, В.В. Омеляновский^{6, 7, 8}, В.А. Гомболевский^{1, 9}

¹ АЙРА Лабс, Москва, Российская Федерация

² Клинический госпиталь на Яузе, Москва, Российская Федерация

³ Национальный медицинский исследовательский центр онкологии имени Н.Н. Блохина, Москва, Российская Федерация

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация

⁵ Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий, Москва, Российская Федерация

⁶ Центр экспертизы и контроля качества медицинской помощи, Москва, Российская Федерация

⁷ Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования, Москва, Российская Федерация

⁸ Научно-исследовательский финансовый институт, Москва, Российская Федерация

⁹ Институт искусственного интеллекта, Москва, Российская Федерация

¹⁰ Техасский университет в Остине, Остин, США

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Технологии искусственного интеллекта призваны помочь в решении проблемы пропуска находок при лучевых исследованиях. Важным вопросом является оценка экономической пользы от внедрения технологий искусственного интеллекта.

Цель — оценить частоту выявления патологических находок и экономический потенциал применения комплексного искусственного интеллекта для компьютерной томографии органов грудной клетки, валидированного экспертами, по сравнению с рентгенологами без доступа к технологиям в условиях частного медицинского центра.

Материалы и методы. Проведено наблюдательное одноцентровое ретроспективное исследование. В исследование включались компьютерные томограммы органов грудной клетки без внутривенного контрастирования, выполненные в ООО «Клинический госпиталь на Яузе» (Москва) в период с 01.06.2022 по 31.07.2022. Компьютерные томограммы обработаны комплексным алгоритмом искусственного интеллекта для десяти патологий: инфильтративные изменения в лёгких, характерные для вирусной пневмонии (COVID-19 в условиях пандемии); лёгочные узлы; свободная жидкость в плевральных полостях; эмфизема лёгких; увеличение диаметра грудной аорты; увеличение диаметра ствола лёгочной артерии; коронарный кальциноз; оценка толщины надпочечников; оценка высоты и плотности тел позвонков. Два эксперта анализировали компьютерные томограммы и сравнивали результаты с анализом искусственного интеллекта. Для всех находок, выявленных и не выявленных врачами клиники, определили дальнейшую маршрутизацию в соответствии с клиническими рекомендациями. Для каждого пациента была рассчитана стоимость неоказанных медицинских услуг по прайс-листу клиники.

Результаты. Итоговую группу составили 160 компьютерных томограмм органов грудной клетки с описаниями. С помощью искусственного интеллекта выявлено 90 (56%) исследований с патологиями, из них в 81 (51%) протоколе была пропущена хотя бы одна патология. Общая стоимость неоказанных медицинских услуг «второго этапа» для всех патологий от 81 пациента была оценена в 2 847 760 руб. (37 250,99 долларов или 256 217,95 китайских юаней). Стоимость неоказанных медицинских услуг только для тех патологий, которые пропущены врачами, но выявлены искусственным интеллектом, составила 2 065 360 руб. (27 016,57 долларов или 185 824,05 китайских юаней).

Заключение. Применение искусственного интеллекта для анализа данных компьютерной томографии органов грудной клетки в качестве помощника рентгенолога позволяет существенно уменьшить число случаев пропуска патологий. Использование искусственного интеллекта может принести в 3,6 раза больше стоимости за медицинские услуги по сравнению со стандартной моделью работы рентгенологов без применения таких технологий, и, таким образом, быть рентабельным для применения в условиях частного медицинского центра.

Ключевые слова: компьютерная томография; искусственный интеллект; грудная клетка; случайные находки.

Как цитировать

Чернина В.Ю., Беляев М.Г., Силин А.Ю., Аветисов И.О., Пятницкий И.А., Петраш Е.А., Басова М.В., Синицын В.Е., Омеляновский В.В., Гомболевский В.А. Диагностическая и экономическая оценка применения комплексного алгоритма искусственного интеллекта, направленного на выявление десяти патологических находок по данным компьютерной томографии органов грудной клетки // *Digital Diagnostics*. 2023. Т. 4, № 2. С. 105–132. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD321963>

Рукопись получена: 07.04.2023

Рукопись одобрена: 22.05.2023

Опубликована: 01.06.2023

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD321963>

Analysis of the diagnostic and economic impact of the combined artificial intelligence algorithm for analysis of 10 pathological findings on chest computed tomography

Valeria Yu. Chernina¹, Mikhail G. Belyaev¹, Anton Yu. Silin², Ivan O. Avetisov², Ilya A. Pyatnitskiy^{1, 10}, Ekaterina A. Petrash^{1, 3}, Maria V. Basova¹, Valentin E. Sinitsyn^{4, 5}, Vitaly V. Omelyanovskiy^{6, 7, 8}, Victor A. Gombolevskiy^{1, 9}

¹ IRA Labs, Moscow, Russian Federation

² Clinical Hospital on Yauza, Moscow, Russian Federation

³ N.N. Blokhin National Medical Research Center of Oncology, Moscow, Russian Federation

⁴ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

⁵ Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies, Moscow, Russian Federation

⁶ The Center for Healthcare Quality Assessment and Control, Moscow, Russian Federation

⁷ Russian Medical Academy of Continuous Professional Education, Moscow, Russian Federation

⁸ Scientific and research financial institute, Moscow, Russian Federation

⁹ Artificial Intelligence Research Institute, Moscow, Russian Federation

¹⁰ The University of Texas at Austin, Austin, Texas, USA

ABSTRACT

BACKGROUND: Artificial intelligence technology can help solve the significant problem of missed findings in radiology studies. An important issue is assessing the economic benefits of implementing artificial intelligence.

AIM: To evaluate the frequency of missed pathologies detection and the economic potential of artificial intelligence technology for chest computed tomography compared and validated by experienced radiologists.

MATERIALS AND METHODS: This was an observational, single-center retrospective study. The study included chest computed tomography without IV contrast from June 1 to July 31, 2022, in Clinical Hospital in Yauza, Moscow. The computed tomography was processed using a complex artificial intelligence algorithm for 10 pathologies: pulmonary infiltrates, typical for viral pneumonia (COVID-19 in pandemic conditions); lung nodules; pleural effusion; pulmonary emphysema; thoracic aortic dilatation; pulmonary trunk dilatation; coronary artery calcification; adrenal hyperplasia; and osteoporosis (vertebral body height and density changes). Two experts analyzed computed tomography and compared results with artificial intelligence. Further routing was determined according to clinical guidelines for all findings initially detected and missed by radiologists. The hospital price list determined the potential revenue loss for each patient.

RESULTS: From the final 160 computed tomographies, the artificial intelligence identified 90 studies (56%) with pathologies, of which 81 (51%) were missing at least one pathology in the report. The “second-stage” lost potential revenue for all pathologies from 81 patients was RUB 2,847,760 (\$37,251 or CNY 256,218). Lost potential revenue only for those pathologies missed by radiologists but detected by artificial intelligence was RUB 2,065,360 (\$27,017 or CNY 185,824).

CONCLUSION: Using artificial intelligence as an “assistant” to the radiologist for chest computed tomography can dramatically minimize the number of missed abnormalities. Compared with the normal model without artificial intelligence, using artificial intelligence can provide 3.6 times more benefits. Using advanced artificial intelligence for chest computed tomography can save money.

Keywords: artificial intelligence; chest; computed tomography; incidental findings.

To cite this article

Chernina VYu, Belyaev MG, Silin AYu, Avetisov IO, Pyatnitskiy IA, Petrash EA, Basova MV, Sinitsyn VE, Omelyanovskiy VV, Gombolevskiy VA. Analysis of the diagnostic and economic impact of the combined artificial intelligence algorithm for analysis of 10 pathological findings on chest computed tomography. *Digital Diagnostics*. 2023;4(2):105–132. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD321963>

Received: 07.04.2023

Accepted: 22.05.2023

Published: 01.06.2023

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD321963>

旨在从胸部电子计算机断层扫描中识别十种病理检查所见的综合人工智能算法使用的诊断和经济评估

Valeria Yu. Chernina¹, Mikhail G. Belyaev¹, Anton Yu. Silin², Ivan O. Avetisov², Ilya A. Pyatnitskiy^{1, 10}, Ekaterina A. Petrash^{1, 3}, Maria V. Basova¹, Valentin E. Sinitsyn^{4, 5}, Vitaly V. Omelyanovskiy^{6, 7, 8}, Victor A. Gombolevskiy^{1, 9}

¹ IRA Labs, Moscow, Russian Federation

² Clinical Hospital on Yauza, Moscow, Russian Federation

³ N.N. Blokhin National Medical Research Center of Oncology, Moscow, Russian Federation

⁴ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

⁵ Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies, Moscow, Russian Federation

⁶ The Center for Healthcare Quality Assessment and Control, Moscow, Russian Federation

⁷ Russian Medical Academy of Continuous Professional Education, Moscow, Russian Federation

⁸ Scientific and research financial institute, Moscow, Russian Federation

⁹ Artificial Intelligence Research Institute, Moscow, Russian Federation

¹⁰ The University of Texas at Austin, Austin, Texas, USA

简评

论证。人工智能技术打算帮助解决射线检验中遗漏发现的问题。一个重要的问题是对采用人工智能技术的经济效益进行的评估。

该研究的目的是评估在私人医疗中心环境下，与不应用技术的放射科医生相比，使用全面的、经过专家验证的人工智能进行胸部电子计算机断层扫描的检测频率和经济潜力。

材料和方法。进行了一项观察性、单中心的回顾性研究。本研究包括2022年6月1日至2022年7月31日在“Clinical Hospital on Yauza”（莫斯科）进行的没有静脉注射对比剂的胸部器官电子计算机断层扫描图像。电子计算机断层扫描图像由人工智能的综合算法处理，用于10种病症：病毒性肺炎（大流行条件下的COVID-19）的肺部浸润性病变；肺结节；胸膜腔内的游离液体；肺气肿；胸主动脉增宽；肺动脉干增宽；冠状动脉钙化；肾上腺厚度的评估；椎体高度和密度的评估。两位专家分析了电子计算机断层扫描图像，并对结果与人工智能分析进行了比较。对于诊所医生检测到和未检测到的所有发现，根据临床指南确定了进一步路由。对于每个病人，根据诊所的价格表，计算出未提供的医疗服务费用。

结果。最后一组由160个带有描述的胸部器官电子计算机断层扫描图像组成。人工智能识别出90个（56%）有病变的研究，其中81个（51%）协议至少有一个遗漏的病变。81名患者的所有病变的未提供的“第二阶段”医疗服务的总成本估计为2,847,760卢布（37,250.99美元或256,217.95人民币）。只有那些被医生遗漏但被人工智能检测出来的病变的未提供医疗服务费用为2,065,360卢布（27,016.57美元或185,824.05人民币）。

结论。来为分析胸部电子计算机断层扫描数据而使用的作为放射科医生助手的人工智能允许大大减少遗漏病变的情况。与不应用这种技术放射科医生工作的标准模式相比，使用人工智能可以为每项医疗服务带来3.6倍的成本，因此，在私人医疗中心环境下的应用具有成本效益。

关键词：电子计算机断层扫描；人工智能；胸廓；偶然发现。

To cite this article

Chernina VYu, Belyaev MG, Silin AYU, Avetisov IO, Pyatnitskiy IA, Petrash EA, Basova MV, Sinitsyn VE, Omelyanovskiy VV, Gombolevskiy VA.旨在从胸部电子计算机断层扫描中识别十种病理检查所见的综合人工智能算法使用的诊断和经济评估. *Digital Diagnostics*. 2023;4(2):105-132. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD321963>

收到: 07.04.2023

接受: 22.05.2023

发布日期: 01.06.2023

Список сокращений и аббревиатур

Датасет (англ. Data set) — набор данных, коллекция логических записей

ДИ — доверительный интервал

ИИ — искусственный интеллект

КТ — компьютерная томография

МКБ-10 — Международная статистическая классификация болезней и проблем, связанных со здоровьем,

Десятого пересмотра

МРТ — магнитно-резонансная томография

СНМУ — стоимость неоказанных медицинских услуг

ОБОСНОВАНИЕ

По данным Всемирной организации здравоохранения, большая часть смертей связана с сердечно-сосудистыми, онкологическими, инфекционными заболеваниями и болезнями лёгких¹. На основании крупных рандомизированных исследований по скринингу рака лёгкого, использование низкодозной компьютерной томографии органов грудной клетки (КТ ОГК) среди бессимптомных пациентов групп риска привело к снижению смертности не только от рака лёгкого, но и от всех причин на 6,7% в рамках Национального скринингового исследования лёгких (National Lung Screening Trial, NLST, США) и на 39% с 5-го по 10-й год наблюдения в мультицентрическом исследовании лёгких (Multicentric Italian Lung Detection, MILD, Италия) благодаря выявлению случайных клинически значимых находок, а также лечению и профилактике соответствующих заболеваний [1, 2].

Программы скрининга рака лёгкого признаны экономически эффективными в группах пациентов с высоким риском заболевания. Этот эффект различается в зависимости от систем здравоохранения в разных странах [3]. При этом отмечается, что в этих программах разница между смертностью от рака лёгкого и общей смертностью существенна. Так, в одном из исследований по скринингу рака лёгкого 77,1% пациентов умерли не от самого заболевания, а от других причин, таких как сердечно-сосудистые патологии, болезни лёгких, другие опухоли, инфекционные заболевания и т.д. [1]. Сфокусировавшись на задаче поиска рака лёгкого, врач-рентгенолог может пропустить патологические находки, связанные с другими заболеваниями. Так, указывалось, что при скрининге рака лёгкого 58% клинически значимых находок не отражаются в текстах протоколов врачей-рентгенологов [4].

Во время пандемии COVID-19 программы скрининга рака лёгкого были приостановлены, так как томографы требовались для проведения массовых КТ ОГК в целях диагностики коронавирусной инфекции. Отмечалось, что у половины пациентов, прошедших КТ ОГК, выявлялись случайные находки, у 1/4 они были клинически значимыми [5]. Объём данных, получаемый при КТ ОГК, позволяет диагностировать заболевания не только лёгких, но и других органов и систем [6–8]. Из-за дефицита медицинских кадров, профессионального выгорания, эффекта пандемии и увеличения нагрузки на врача создаётся угроза пропуска клинически значимых находок.

Самые большие надежды на решение этой проблемы возлагаются на технологии искусственного интеллекта (ИИ), поэтому важным вопросом является оценка экономической пользы от применения инновации. Среди сервисов ИИ для здравоохранения наибольшее количество продуктов было создано для лучевой диагностики: их в несколько раз больше, чем во всех остальных медицинских специальностях, вместе взятых². В Российской Федерации (РФ) самым большим проектом, использующим ИИ для лучевой диагностики, является эксперимент по использованию инновационных технологий в области компьютерного зрения для анализа медицинских изображений и дальнейшего применения в системе здравоохранения города Москвы (далее — Московский эксперимент), в рамках которого было обработано более 7,5 млн лучевых исследований, включая рентгенографические, маммографические и компьютерно-томографические³ [9].

Обобщая вышесказанное, применение алгоритмов ИИ, направленных на поиск одной патологии, имеет ограниченное значение для практической работы по борьбе с заболеваниями, являющимися основной причиной

¹ who.int [интернет]. 10 ведущих причин смерти в мире [цит.: 09.12.2020]. Режим доступа: <https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death>.

² IQVIA [интернет]. FDA Publishes Approved List of AI/ML-enabled Medical Devices [cite 2021 Oct 29]. Michaela Miller, Technology & Analytics Practice Lead, U.S. MedTech, IQVIA. Режим доступа: <https://www.iqvia.com/locations/united-states/blogs/2021/10/fda-publishes-approved-list-of-ai-ml-enabled-medical-devices>.

³ Центр диагностики и телемедицины [интернет]. Эксперимент (<https://mosmed.ai/ai/>); Наборы данных (<https://mosmed.ai/datasets/>). Дата обращения: 17.03.2023.

смертности. Учитывая потребность одномоментного выявления нескольких видов патологий с помощью ИИ, появились первые программные продукты, предлагающие комплексный анализ КТ ОГК, прошедшие все этапы тестирования и разрешённые для применения в проспективном режиме в 153 медицинских организациях города Москвы⁴. Одним из таких продуктов является комплексный ИИ Multi-IRA от компании «АЙРА Лабс», который может одновременно осуществлять поиск десяти патологических признаков различных заболеваний на КТ [10–13], а именно:

- 1) инфильтративных изменений в лёгких, характерных для вирусной пневмонии (COVID-19 в условиях пандемии; U07 по Международной классификации болезней 10-го пересмотра, МКБ-10), с оценкой процента поражения лёгких;
- 2) лёгочных узлов с оценкой размера, объёма и плотности для выявления злокачественных новообразований в лёгких (С34 по МКБ-10);
- 3) свободной жидкости (выпота) в плевральных полостях (J94 по МКБ-10);
- 4) эмфиземы лёгких как проявления хронической обструктивной болезни лёгких (J44 по МКБ-10);
- 5) определения диаметра грудной аорты для поиска её дилатации и аневризм (I70 и I71 по МКБ-10);
- 6) определения диаметра ствола лёгочной артерии для поиска причин возможной лёгочной гипертензии (I27 по МКБ-10);
- 7) анализ выраженности коронарного кальциноза по индексу Agatston для оценки тяжести коронарного атеросклероза и риска ишемической болезни сердца (I20–I25 по МКБ-10);
- 8) оценки толщины надпочечников для поиска образований и гиперплазии (С74 по МКБ-10);
- 9) высоты тел позвонков для диагностики компрессионных переломов (M80–M85 по МКБ-10);
- 10) анализ плотности тел позвонков для поиска признаков остеопороза (M80–M85 по МКБ-10).

Цель исследования — оценить частоту выявления значимых патологических находок и экономический потенциал применения технологий комплексного ИИ при анализе КТ ОГК, валидированного врачами-рентгенологами, по сравнению с врачами-рентгенологами без доступа к ИИ в условиях частного медицинского центра.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Дизайн исследования

Проведено наблюдательное одноцентровое ретроспективное исследование. Информированное согласие от пациентов не требовалось. Статья подготовлена

в соответствии с контрольным списком CHEERS 2022, предназначенным для экономической оценки исследований в медицине⁵ [14]. Был разработан план экономического анализа для частного медицинского центра в виде оценки потенциальной дополнительной стоимости не оказанных медицинских услуг (СНМУ), которые должны быть предоставлены пациентам согласно клиническим рекомендациям и лучшим практикам доказательной медицины на основании патологических находок. СНМУ может принести применение комплексного ИИ сверх того, что приносят врачи-рентгенологи, за счёт дальнейших диагностических действий для уточнения природы и тяжести выявленных при КТ находок.

В рамках данного исследования оценка стоимости лечения не проводилась.

Схема проведения исследования представлена на рис. 1.

Критерии соответствия

Для формирования группы исследования были использованы критерии включения и исключения.

Критерии включения: КТ ОГК мужчин и женщин, обратившихся за медицинской помощью в медицинскую организацию, оказывающую первичную санитарную и специализированную медицинскую помощь взрослому населению города Москвы; КТ ОГК проведены и интерпретированы врачами-рентгенологами в период с 01.06.2022 по 31.07.2022; КТ ОГК проведены без внутривенного контрастирования; возраст пациентов старше 18 лет; наличие изображений КТ-исследований в формате DICOM и наличие текстов протоколов описаний исследований от врачей-рентгенологов медицинской организации; первичное посещение пациентом медицинской организации.

Критерии исключения: возраст старше 85 лет; предыдущее КТ ОГК выполнялось в пределах одного года; ИИ не смог обработать исследование по причинам, не зависящим от алгоритма (например, неподходящая модальность, область исследования, отличная от ОГК, недостаточное число срезов — менее 30); ИИ не смог обработать исследование по причинам, зависящим от особенностей работы самого алгоритма (например, некорректная работа из-за наличия выраженных артефактов от металлоконструкций на уровне сканирования).

Условия проведения

КТ-исследования проводились в многопрофильной частной медицинской организации ООО «Клинический госпиталь на Яузе», оказывающей первичную медико-санитарную и специализированную медицинскую помощь взрослому населению Москвы.

⁴ Центр диагностики и телемедицины [интернет]. ООО «АЙРА Лабс» Chest-IRA. Режим доступа: https://mosmed.ai/service_catalog/chestira/.

⁵ EQUATOR Network [интернет]. Enhancing the QUALity and Transparency Of health Research. Режим доступа: <https://www.equator-network.org/reporting-guidelines/cheers/>.

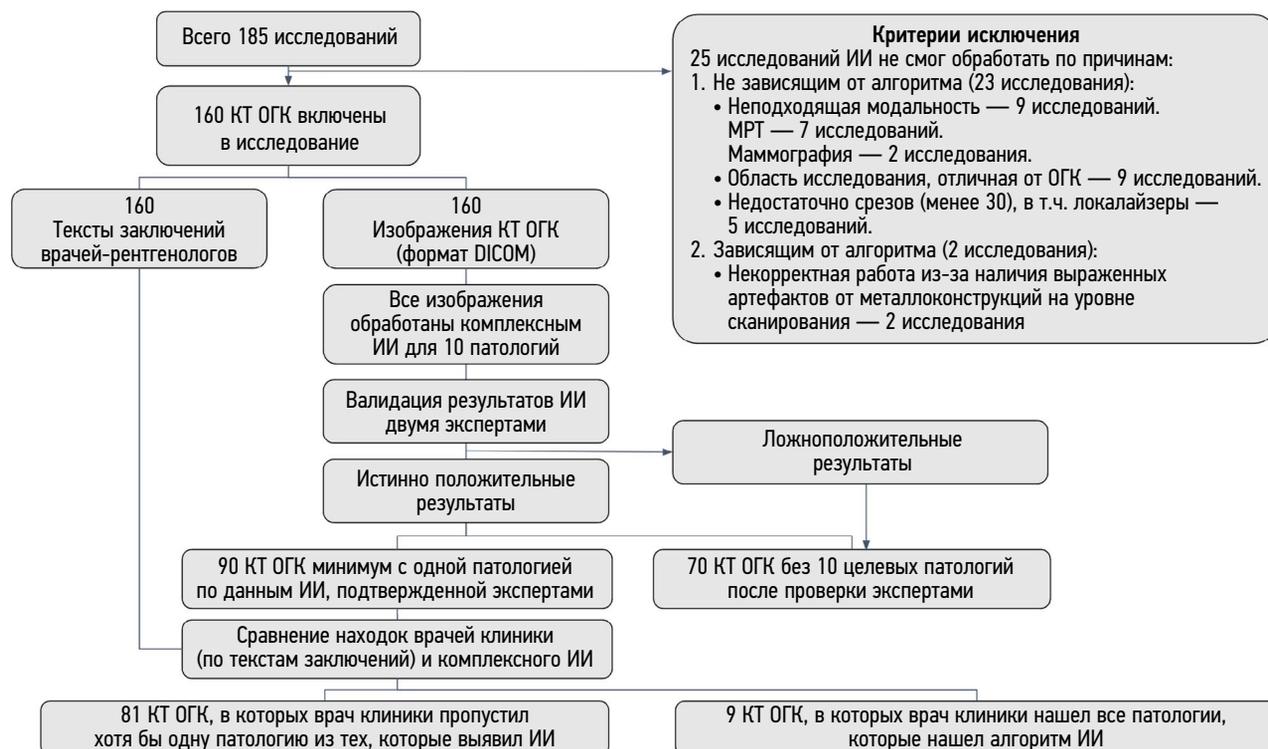


Рис. 1. Дизайн исследования.

Продолжительность исследования

Исследование проведено на данных КТ, выполненных в период с 01.06.2022 по 31.07.2022. Ретроспективный анализ с помощью ИИ и проверка результатов экспертами проводились в период с 01.10.2022 по 30.11.2022.

Описание исследования

КТ ОГК были проведены без внутривенного контрастирования на компьютерном томографе Philips Ingenuity CT. Томограф выполнял 128 срезов за один оборот трубки. Протокол сканирования ОГК выполнялся в соответствии со стандартными рекомендациями производителя оборудования и национальными рекомендациями. Результаты КТ предоставлялись врачам и ИИ в двух сериях: выполненные при реконструкции с мягкотканым ядром (60 HU — центр окна, 360 HU — ширина окна) и лёгочным ядром (-500 HU — центр окна, 1500 HU — ширина окна). Толщина срезов равнялась 1,0 мм. Использовались алгоритмы итеративной модельной реконструкции (iterative model reconstruction, IMR), направленной на повышение качества изображения (снижения шума) и снижение дозы лучевой нагрузки на пациента.

Все включённые КТ-исследования были обработаны с помощью программы комплексного ИИ Multi-IRA компании «АЙРА Лабс», интегрированной в электронный архив (picture archiving and communication system, PACS)

клиники. Используемые в данном исследовании алгоритмы ИИ ранее прошли тестирование на специально подготовленных калибровочных датасетах в рамках Московского эксперимента по применению ИИ⁶.

Критерием возможности использования алгоритма ИИ являлась их точность не ниже площади под ROC-кривой (ROC AUC) 0,81 для каждой патологии, согласно методическим рекомендациям по клиническим испытаниям программного обеспечения на основе интеллектуальных технологий [15]. Величины метрик диагностической точности для алгоритмов ИИ, полученные на независимых от разработчика закрытых датасетах в рамках Московского эксперимента, представлены в табл. 1 [9, 10].

Основной исход исследования

Для всех находок, выявленных и пропущенных врачами медицинской организации, были определены «вторые этапы» (консультации профильных специалистов и различные виды клинического, инструментального и лабораторного дообследования), т.е. дальнейшая маршрутизация пациента в соответствии с действующими клиническими рекомендациями для каждой патологии (доп. материалы табл.10).

Затем для каждого пациента была рассчитана СНМУ по прайс-листу клиники, которая определялась исходя из невыполненных, согласно клиническим рекомендациям,

⁶ Центр диагностики и телемедицины [интернет]. ООО «АЙРА Лабс»: Chest-IRA (https://mosmed.ai/service_catalog/chestira/); Adrenal-IRA Abd (https://mosmed.ai/service_catalog/adrenalira/); Aorta-IRA Abd (https://mosmed.ai/service_catalog/aortaira/); Genant-IRA Abd (https://mosmed.ai/service_catalog/genant-ira/). Дата обращения: 17.03.2023.

Таблица 1. Величины метрик диагностической точности для комплексного искусственного интеллекта для компьютерной томографии органов грудной клетки, полученные на датасетах в рамках Московского эксперимента

Название алгоритма искусственного интеллекта Multi-IRA для отдельных видов патологий	ROC AUC	Чувствительность	Специфичность	Точность
COVID-IRA (выявление областей инфильтрации лёгких)	0,98	0,95	0,94	0,94
LungNodule-IRA (выявление узлов в лёгких)	0,932	0,86	0,9	0,88
PleuralEffusion-IRA (выявление плеврального выпота)	0,999	0,98	1	0,99
Aorta-IRA (ОГК) (анализ диаметра грудной аорты)	0,997	0,96	1	0,98
Aorta-IRA (ОГК+ОБП) (анализ диаметра грудной и брюшной орты)	1	0,98	1	0,99
PulmTrunk-IRA (анализ диаметра ствола лёгочной артерии)	1	1	0,98	0,99
Agatston-IRA (анализ кальциевого индекса по Agatson)	0,986	0,96	0,96	0,96
Genant-IRA (анализ высоты тел позвонков)	0,995	1	0,98	0,99
Emphysema-IRA (выявление эмфиземы)	0,989	0,94	0,98	0,96
Adrenal-IRA (оценка толщины надпочечников для поиска образований и гиперплазии)	0,96	1	0,96	0,98

необходимых медицинских услуг ввиду пропущенной патологии. Дополнительно был проведён расчёт СНМУ от пропусков значимых видов патологии в соответствии с табл. 2 [16–31]. Пропусками у врачей считалось отсутствие информации о патологической находке в финализированных текстах описаний КТ в электронной медицинской информационной системе медицинской организации при наличии такой информации по данным истинно положительных результатов (ground truth) после пересмотра данных КТ врачами-экспертами в сочетании с анализом ИИ. Истинно положительными считались находки, выявленные алгоритмом ИИ, которые были подтверждены двумя врачами-экспертами при анализе изображений КТ.

Дополнительные исходы исследования

Дополнительно для каждого врача-рентгенолога клиники было посчитано количество протоколов со значимыми и незначимыми пропусками, а также проценты ошибочных протоколов.

Анализ в подгруппах

Два эксперта (врачи-рентгенологи с опытом работы 10 и 13 лет соответственно, не являющиеся сотрудниками медицинской организации, данные которой применялись в исследовании), пересмотрели КТ вместе с результатами обработки алгоритмом ИИ для исключения ошибочных срабатываний программы. При противоположных

мнениях принималось единое решение после коллегиального обсуждения. В результате такого анализа были отобраны истинно положительные результаты анализа комплексного ИИ, подтверждённые двумя экспертами. Затем находки, предложенные ИИ, были сопоставлены с финализированными текстами протоколов описаний КТ ОГК, написанными врачами-рентгенологами медицинской организации без использования ИИ, и были выявлены случаи пропуска патологий. Все пропуски патологии врачами-рентгенологами медицинской организации были разделены на значимые и незначимые. Критерии значимости патологий оценивались в соответствии с базовыми диагностическими требованиями к результатам работы ИИ, используемыми для проведения Московского эксперимента, согласованными научно-проблемной комиссией ГБУЗ НПКЦ ДиТ ДЗМ, протоколы от 10.12.2021 № 9/2021, от 28.02.2022 № 1/2022, от 06.12.2022 № 7/2022, от 13.01.2023 № 1/2023. Эти требования основаны на клинических рекомендациях и лучших практиках, обоснованных с точки зрения доказательной медицины.

Оценка текстов протоколов по наличию/отсутствию упоминания эпикардального жира не проводилась в данном исследовании, так как у врачей-рентгенологов медицинской организации не было инструментов для измерения объёмов жировой ткани. Критерии патологий, а также распределение по значимости пропусков представлены в табл. 2.

Таблица 2. Критерии патологических находок и пропусков

Патология	Критерии патологии	Критерии пропуска значимой патологии	Критерии пропуска незначимой патологии
Лёгочные узлы	Хотя бы один солидный или субсолидный (измеряется только солидный компонент) узел со средним размером ≥ 6 мм (объём ≥ 100 мм ³) [16]	Все находки данной патологии, соответствующие описанным критериям, считаются значимыми, кроме перифиссуральных узлов. Узлы по ходу плевры являются доброкачественными изменениями и не требуют дальнейшего наблюдения	
Инфильтративные изменения в лёгких, характерные для вирусной пневмонии (COVID-19) в условиях пандемии	1. Инфильтрация лёгочной паренхимы по типу матового стекла с обеих сторон, преимущественно периферической локализации, с наличием или без инфильтрации лёгочной паренхимы по типу консолидации с положительным признаком воздушной бронхограммы. 2. Инфильтрация лёгочной паренхимы по типу булыжной мостовой (утолщение междолькового интерстиция на фоне «матового стекла») с обеих сторон, преимущественно периферической локализации, с наличием или без инфильтрации лёгочной паренхимы по типу консолидации с положительным признаком воздушной бронхограммы [17, 18]	Объём поражения лёгких $>50\%$	Объём поражения лёгких $<50\%$
Эмфизема лёгких	Наличие суммарно в обоих лёгких $\geq 6\%$ (по объёму) участков (без учёта просвета бронхов) с КТ плотностью ≤ -950 HU [19, 20]	Все находки данной патологии, соответствующие описанным критериям, считались значимыми	
Свободная жидкость (выпот) в плевральных полостях	Наличие в плевральной полости серповидного скопления жидкостного содержимого (выпота) плотностью 0–30 HU в гравитационно зависимых отделах грудной клетки [21]	Максимальная толщина слоя >10 мм	Максимальная толщина слоя <10 мм
Аневризма / дилатация аорты	1. Дилатация восходящей части грудной аорты: на нативных изображениях наибольший диаметр восходящей части грудной аорты от 40 до 49 мм включительно в аксиальной плоскости. 2. Аневризма восходящей части грудной аорты: на нативных изображениях наибольший диаметр восходящей части грудной аорты ≥ 50 мм в аксиальной плоскости. 3. Дилатация нисходящей части грудной аорты: на нативных изображениях наибольший диаметр нисходящей части грудной аорты от 31 до 39 мм в аксиальной плоскости. 4. Аневризма нисходящей части грудной аорты: на нативных изображениях наибольший диаметр нисходящей части грудной аорты ≥ 40 мм в аксиальной плоскости [#] [22]. 5. Дилатация брюшного отдела аорты: наибольший диаметр от 25 до 29 мм включительно. 6. Аневризма брюшного отдела аорты: наибольший диаметр ≥ 30 мм [23, 24]	Аневризма восходящей части (диаметр ≥ 50 мм) и нисходящей части грудной аорты (диаметр ≥ 40 мм); аневризма брюшного отдела аорты (диаметр ≥ 30 мм)	Дилатация восходящей части (диаметр от 40 до 49 мм) и нисходящей части (диаметр от 31 до 39 мм) грудной аорты; дилатация брюшного отдела аорты (диаметр ≥ 30 мм)
Дилатация лёгочного ствола	Диаметр лёгочного ствола ≥ 29 мм ^{##} [25]	>29 мм	29 мм
Коронарный кальциноз по индексу Agatston	На нативных изображениях кальциевый индекс/индекс Agatston (сумма площадей в проекции коронарных сосудов, умноженных на индивидуальные факторы плотности*) ≥ 1 , либо класс CAC-DRS A1–A3 [26, 27]. *Фактор 1: 130–199 HU Фактор 2: 200–299 HU Фактор 3: 300–399 HU Фактор 4: ≥ 400 HU	Индекс Agatston >10	Индекс Agatston от 1 до 10

[#] Рабочая группа по диагностике и лечению заболеваний аорты Европейского общества кардиологов (ESC). Рекомендации ESC по диагностике и лечению заболеваний аорты, 2014. Режим доступа: https://scardio.ru/content/Guidelines/Recom%20po%20aorte%207_rkj_15.pdf.

^{##} Рабочая группа по диагностике и лечению легочной гипертензии Европейского общества кардиологов (ESC) и Европейского общества пульмонологов (ERS). Рекомендации ESC/ERS по диагностике и лечению легочной гипертензии, 2015. Режим доступа: https://scardio.ru/content/Guidelines/ESC%20_L_hypert_2015.pdf.

Таблица 2. Окончание

Патология	Критерии патологии	Критерии пропуска значимой патологии	Критерии пропуска незначимой патологии
Оценка толщины надпочечников для поиска образований и гиперплазии	Узловые образования тела или ножек надпочечника с диаметром по короткой оси ≥ 10 мм [28]	Все находки данной патологии, соответствующие описанным критериям, считаются значимыми	
Оценка плотности губчатого вещества тел позвонков для выявления остеопороза / остеопении	Снижение минеральной плотности костной ткани в телах позвонков в интервале Th11–L3 (оптимально L1–L2) согласно критериям ACR 2018, позиции ISCD 2019 [29]	Плотность $< +100$ HU	Плотность от $+100$ до $+150$ HU
Компрессионные переломы позвонков для выявления остеопороза	Наличие позвонков, имеющих компрессионную деформацию тел $\geq 25\%$ по полуколичественной шкале Genant, II–III степень [30, 31]. Степень деформации (СД) рассчитывается по формуле: $СД = (\text{отношение максимального размера тела позвонка} - \text{минимальный/максимальный размер}) \times 100\%$	Все находки данной патологии, соответствующие описанным критериям, считались значимыми	

Этическая экспертиза

Было отправлено уведомление в Независимый этический комитет Московского регионального отделения Российского общества рентгенологов и радиологов о проведении ретроспективного исследования (протокол от 01.03.2023).

Статистический анализ

Для представления результатов были использованы методы описательной статистики с указанием абсолютно-го числа (n) и доли (%) наблюдений в каждой категории. Сравнение частоты обнаружения патологий разными методами проводилось с помощью Z-теста для пропорций. Полученные для каждой из 9 патологий p -значения корректировались на множественное тестирование (в рамках общей гипотезы об отсутствии статистически значимой разницы между результатами диагностик) поправкой Бонферрони. Анализ финансовых показателей выполнялся с помощью парного t -теста. Уровнем статистической значимости для p считалось значение 0,05. Статистический анализ был проведён с помощью программы R v. 4.1.3.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Объекты (участники) исследования

Всего было отобрано 185 исследований (соотношение мужчин/женщин — 47/53%; возраст от 19 до 83 лет, средний возраст 49,5 лет), соответствующих указанным критериям, из них 25 исследований не были обработаны ИИ по следующим причинам:

1) независимые от ИИ (23 исследования):

- неподходящая модальность (9 исследований): МРТ — 7; маммография — 2);

- область исследования, отличная от ОГК (9 исследований);
 - недостаточное число срезов (менее 30), в том числе локализаторы (5 исследований);
- 2) зависящие от ИИ (2 исследования):
- некорректная работа из-за наличия выраженных артефактов от металлоконструкций на уровне сканирования (2 исследования).

Итоговую группу для анализа составили 160 случаев КТ ОГК с текстами описаний врачей. Дополнительная информация о наличии у пациентов онкологических, сердечно-сосудистых и других хронических заболеваний не собиралась, так как в данную медицинскую организацию пациенты обращались только по полисам обязательного или добровольного медицинского страхования, а также на платной основе к узкопрофильным специалистам. Информация в медицинской информационной системе об установленных диагнозах с высокой вероятностью была неполноценной.

Основные результаты исследования

Была настроена автоматическая анонимизация и передача КТ-исследований от медицинской организации к разработчику комплексного ИИ для КТ ОГК, а также возвращение результатов анализа в медицинскую организацию и экспертам для валидации результатов работы ИИ. Эксперты предоставили список всех расхождений между верифицированными результатами ИИ и текстами протоколов сотрудникам медицинской организации для контроля качества (рис. 2). Апелляций со стороны клиники не последовало. Наибольшее количество клинически значимых пропусков в текстах протоколов выявлено для случаев остеопороза

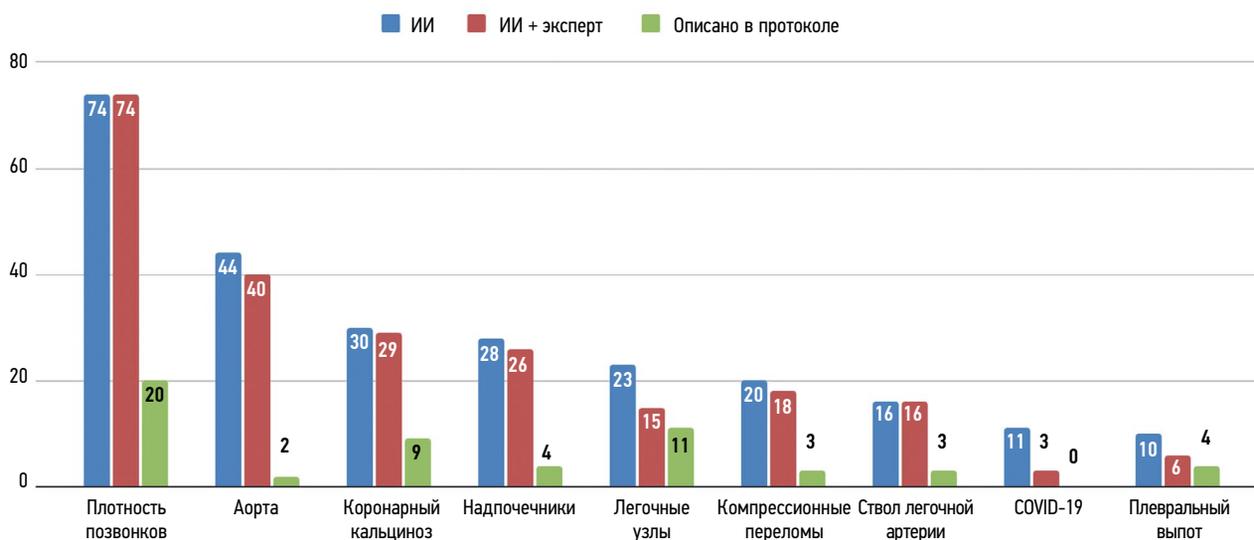


Рис. 2. Результаты исследования по количеству находок, выявленных с/без использования искусственного интеллекта.

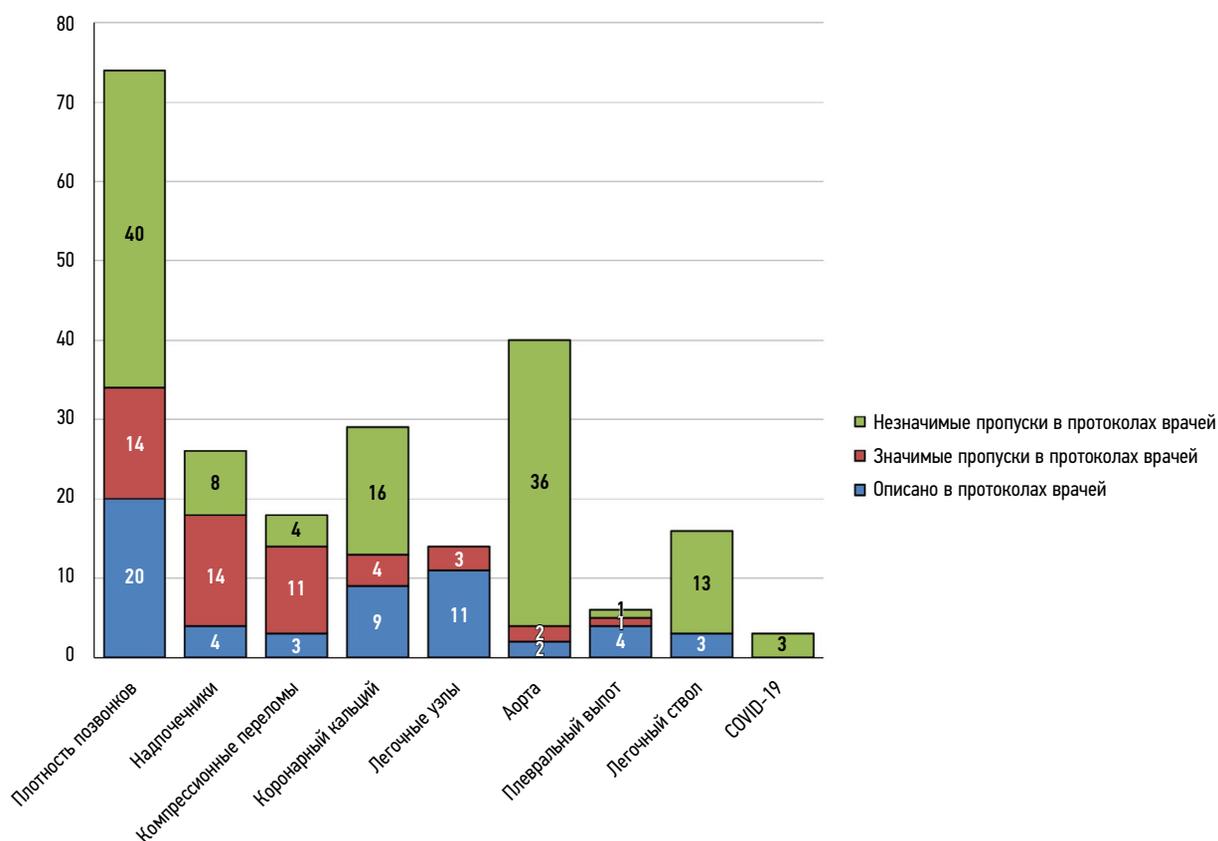


Рис. 3. Результаты исследования по количеству находок (ранжированы по количеству значимых пропусков).

и образований надпочечников (по 14 случаев). Наибольшее количество незначимых пропусков выявлено для расширения аорты (36 случаев) и остеопении (40 случаев). Подробные результаты по количеству находок представлены на рис. 3.

С помощью ИИ выявлено 90 (56%) исследований с патологией, из них в 81 (51%) протоколе врачей медицинской организации была пропущена хотя бы одна патология. В 70 исследованиях алгоритм ИИ не выявил

патологий. Следует отметить, что в представленных исследованиях могли быть другие патологические находки, которые не входили в программу анализа программы комплексного ИИ в этом исследовании. Сводные данные анализа представлены в табл. 3.

В одном КТ-исследовании могло быть несколько патологий, часть из которых нашёл врач из медицинской организации (описал в протоколе), а другую часть нашёл только ИИ (потенциальная польза ИИ).

Таблица 3. Сводные данные по количеству пациентов с выявленными и пропущенными патологиями

Параметр	Количество	Число всех случаев, %	Оценка патологии, %
Всего пациентов	160	100	-
Без патологических находок	70	44	-
С патологическими находками	90	56	100
Врач медицинской организации нашёл хотя бы одну патологию из тех, которые выявил искусственный интеллект	35	22	39
Врач медицинской организации пропустил хотя бы одну патологию из тех, которые выявил искусственный интеллект	81	51	90
Компьютерно-томографические исследования, в которых патологические изменения нашёл только алгоритм искусственного интеллекта	55	34	61

Детальное представление анализа по СНМУ вследствие пропусков патологии по каждому из 90 пациентов показано на рис. 4.

При сопоставлении двух диагностических подходов (алгоритм с проверкой экспертом против врача медицинской организации без ИИ) статистически значимыми оказались сравнения для следующих патологических находок: аневризмы/дилатации аорты; расширения диаметра ствола лёгочной артерии; оценки коронарного кальциевого индекса, компрессионных переломов позвонков, снижения плотности тел позвонков и утолщения надпочечников (табл. 4).

Предполагаемая СНМУ «второго этапа» для всех пропущенных патологий у 81 пациента суммарно составила

2 847 760 руб. (\$37 250,99 или 256 217,95 CNY), на одного пациента — 17 799 руб. (\$232,83 или 1601,41 CNY). СНМУ «второго этапа» только для тех патологий, которые были пропущены в протоколах врачами медицинской организации, но были выявлены ИИ и подтверждены экспертами, суммарно составила 2 065 360 руб. (\$27 016,57 или 185 824,05 CNY), на одного пациента — 12 909 руб. (\$168,86 или 1161,45 CNY). Результаты расчёта СНМУ для всех находок представлены в табл. 5.

По результатам расчётов, суммарная СНМУ только от значимых пропусков составила 770 855 руб. (\$10 083,4 или 69 355,17 CNY), на одного пациента — 4818 руб. (\$63,02 или 433,48 CNY). Результаты анализа представлены в табл. 6.

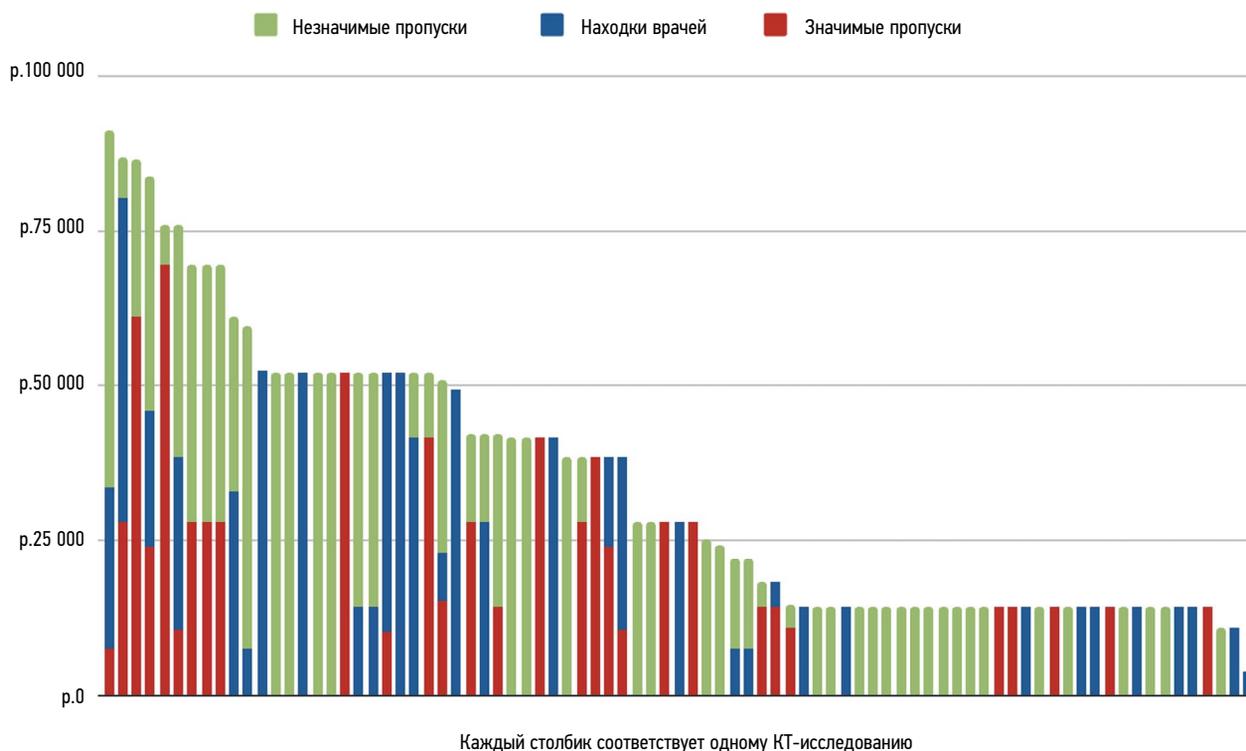
**Рис. 4.** Анализ стоимости неокказанных медицинских услуг вследствие пропусков патологий по всему диапазону выполненных компьютерных томографий (КТ).

Таблица 4. Сравнение двух диагностических подходов к поиску анализируемых патологий

Параметр	Количество выявленных случаев	Доля [95% ДИ]	95% ДИ для разности долей	<i>p</i> Z-тест H0: доли равны (коррекция Бонферрони)
<i>Признаки COVID-19 по данным компьютерной томографии</i>				
Алгоритм+эксперт	3	0,016 [0,003; 0,047]	[-0,008; 0,04]	0,246 (1)
Протокол	0	0 [0; 0,02]	-	-
<i>Лёгочные узлы</i>				
Алгоритм+эксперт	15	0,082 [0,047; 0,132]	[-0,036; 0,08]	0,542 (1)
Протокол	11	0,06 [0,031; 0,106]	-	-
<i>Выпот</i>				
Алгоритм+эксперт	6	0,033 [0,012; 0,07]	[-0,028; 0,05]	0,749 (1)
Протокол	4	0,022 [0,006; 0,055]	-	-
<i>Аорта</i>				
Алгоритм+эксперт	40	0,22 [0,162; 0,287]	[0,141; 0,276]	<0,001 (<0,001)
Протокол	2	0,011 [0,001; 0,039]	-	-
<i>Ствол лёгочной артерии</i>				
Алгоритм+эксперт	16	0,088 [0,051; 0,139]	[0,021; 0,122]	0,005 (0,042)
Протокол	3	0,016 [0,003; 0,047]	-	-
<i>Коронарный кальциноз</i>				
Алгоритм+эксперт	29	0,159 [0,109; 0,221]	[0,043; 0,177]	0,001 (0,01)
Протокол	9	0,049 [0,023; 0,092]	-	-
<i>Компрессионные переломы позвонков</i>				
Алгоритм+эксперт	18	0,1 [0,06; 0,152]	[0,03; 0,135]	0,002 (0,015)
Протокол	3	0,016 [0,003; 0,047]	-	-
<i>Оценка минеральной плотности тел позвонков</i>				
Алгоритм+эксперт	74	0,407 [0,335; 0,482]	[0,207; 0,387]	<0,001 (<0,001)
Протокол	20	0,11 [0,068; 0,165]	-	-
<i>Утолщения надпочечников</i>				
Алгоритм+эксперт	26	0,143 [0,095; 0,202]	[0,06; 0,181]	<0,001 (0,001)
Протокол	4	0,022 [0,006; 0,055]	-	-

Сравнение стоимостей проводили при помощи парного *t*-теста с вычислением средней разницы на одного пациента и построения 95% доверительного интервала (ДИ).

Таким образом, 160×12 908,5 [160×9833,5; 160×15 983,5] даёт общую СНМУ по популяции анализа со своим ДИ. Результаты представлены в табл. 7.

Таблица 5. Анализ предполагаемой стоимости неоказанных медицинских услуг от всех пропущенных находок на компьютерной томографии

Параметр	Расчёт на всех пациентов пилотного проекта (руб. / доллары США / юани)				Расчёт на одного пациента (руб. / доллары США / юани)			
	Стоимость							
	Суммарная (все)	Консультации (все)	Добследования (все)	Follow-up (все)	Суммарная (все)	Консультации (все)	Добследования (все)	Follow-up (все)
Стоимость «второго этапа» диагностики для всех патологий	2 847 760/ 37 250,99/ 256 217,95	463 300/ 6060,34/ 41 683,91	2 049 760/ 26 812,51/ 184 420,49	334 700/ 4378,15/ 30 113,54	17 799/ 232,83/ 1601,41	2896/ 37,88/ 260,56	12 811/ 167,58/ 1152,63	2092/ 27,37/ 188,22
Стоимость «второго этапа» только по тем патологиям, которые были пропущены врачом и найдены алгоритмом искусственного интеллекта	2 065 360/ 27 016,57/ 185 824,05	326 800/ 4274,81/ 29 402,77	1 519 460/ 19 875,76/ 136 708,47	219 100/ 2866/ 19 712,81	12 909/ 168,86/ 1161,45	2043/ 26,72/ 183,81	9497/ 124,23/ 854,46	1369/ 17,91/ 123,17
Стоимость «второго этапа» только по патологиям, найденным врачами	782 400/ 10 234,42/ 70 393,9	136 500/ 1785,53/ 12 281,14	530 300/ 6936,75/ 47 712,02	115 600/ 1512,14/ 10 400,73	4890/ 63,97/ 439,96	853/ 11,16/ 76,75	3314/ 43,35/ 298,17	723/ 9,46/ 65,05

Таблица 6. Результаты по стоимости неоказанных медицинских услуг от пропуска значимых находок

Параметр	Расчёт на всех пациентов пилотного проекта (руб. / доллары / юани)				Расчёт на одного пациента (руб. / доллары / юани)			
	Стоимость							
	Суммарная (все)	Консультации (все)	Добследования (все)	Follow-up (все)	Суммарная (все)	Консультации (все)	Добследования (все)	Follow-up (все)
Стоимость «второго этапа» по отношению к значимым пропускам патологии врачами	770 855/ 10 083,4/ 69 355,17	113 100/ 1479,44/ 10 175,8	584 255/ 7642,53/ 52 566,44	73 500/ 961,44/ 6612,92	4818/ 63,02/ 433,48	707/ 9,25/ 63,61	3652/ 47,77/ 328,58	459/ 6/ 41,3
Стоимость «второго этапа» по отношению к найденным врачами патологиям	782 400/ 10 234,42/ 70 393,9	136 500/ 1785,53/ 12 281,14	530 300/ 6936,75/ 47 712,02	115 600/ 1512,14/ 10 400,73	4890/ 63,97/ 439,96	853/ 11,16/ 76,75	3314/ 43,35/ 298,17	723/ 9,46/ 65,05

Итоговая экономическая эффективность использования алгоритма ИИ в медицинской организации представлена на рис. 5.

Пример расчёта стоимости неоказанных медицинских услуг

Врач из медицинской организации верно описал в протоколе расширение ствола лёгочной артерии до 34 мм, повышенный кальциевый индекс по Agatston до 350, снижение плотности позвонков максимально до +90 HU; алгоритм ИИ также нашёл перечисленные патологии. Кроме

того, алгоритм ИИ нашёл патологии, которые врач не описал, а именно узел в лёгком диаметром до 10×9 мм, дилатацию грудного отдела аорты до 45 мм, утолщение надпочечника до 14 мм. Пример расчёта СНМУ в таком случае представлен в табл. 8.

Дополнительные результаты исследования

Итоговые результаты по количеству протоколов со значимыми и незначимыми пропусками, а также проценты ошибочных протоколов представлены в табл. 9. В одном и том же протоколе могли быть как значимые, так

Таблица 7. Экономическая эффективность

Когорта	Статистика	Стоимость			p (парный t-тест)
		Суммарная (все)	Суммарная (находки врачей)	Средняя разница с 95% ДИ	
Полная когорта	n	160	160	12 908,5	<0,001
	Среднее	17 798,5	4890	[9833,5; 15 983,5]	
	СО	23 304,74	11 945	-	
	Минимум	0	0	-	
	Первый квартиль	0	0	-	
	Медиана	12 635	0	-	
	Третий квартиль	27 900	0	-	
	Максимум	91 095	52 420	-	
	% нулевых значений	46,88	79,38	-	
Когорта со всеми обнаруженными находками	n	81	81	24 298,4	<0,001
	Среднее	33 503,06	9204,71	[19 701,9; 28 894,8]	
	СО	22 262,46	15 162,13	-	
	Минимум	3900	0	-	
	Первый квартиль	14 395	0	-	
	Медиана	27 900	0	-	
	Третий квартиль	51 995	14 395	-	
	Максимум	91 095	52 420	-	
	% нулевых значений	-	61,18	-	
Когорта по значимым находкам	n	32	32	17 104,7	<0,001
	Среднее	24 089,22	6984,53	[8726,8; 25 482,6]	
	СО	15 568,37	13 799,84	-	
	Минимум	7600	0	-	
	Первый квартиль	14 395	0	-	
	Медиана	19 700	0	-	
	Третий квартиль	27 900	4825	-	
	Максимум	69 500	52 420	-	
	% нулевых значений	-	71,88	-	

и незначимые пропуски патологий. Всего из 160 проанализированных протоколов в 81 были найдены значимые и незначимые пропуски, что составило 50,6% от общего количества КТ. Средний процент протоколов со значимыми пропусками составил 28,1% (max 56,9; min 5), с незначимыми пропусками — 27,2% (max 74,1; min 5).

Общее число протоколов статистически значимо увеличивало количество ошибок. Общий стаж работы в рентгенологии (без учёта ординатуры) и торакальной рентгенологии (с учётом ординатуры) уменьшал количество ошибок. Однако эти данные не являются репрезентативными в силу малой выборки врачей и наличия доминантного случая. Подробные данные по стажу врачей представлены в дополнительных материалах (табл. 10, 11).

Примеры работы алгоритма ИИ представлены на рис. 6 и 7.

Нежелательные явления

В результате исследования нежелательных явлений не отмечалось.

ОБСУЖДЕНИЕ

Резюме основного результата исследования

В результате исследования удалось впервые показать предполагаемый экономический эффект, который возможно получить от применения комплексного программного продукта на основе технологии ИИ для анализа

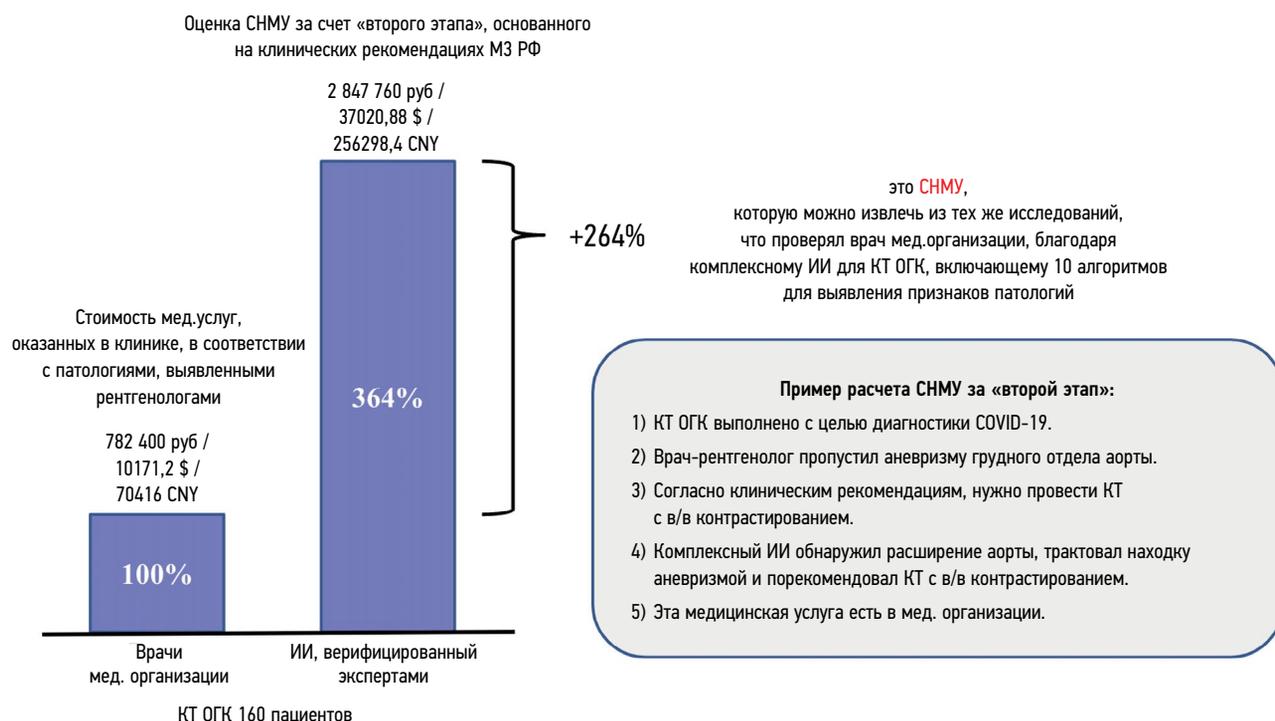


Рис. 5. Спектр стоимости неоказанных медицинских услуг от применения комплексного искусственного интеллекта для компьютерной томографии органов грудной клетки в медицинской организации. ИИ — искусственный интеллект; КТ — компьютерная томография; ОГК — органы грудной клетки; СНМУ — стоимость неоказанных медицинских услуг.

Таблица 8. Пример расчёта стоимости неоказанных медицинских услуг по данным одной компьютерной томографии органов грудной клетки

<i>Рекомендации и стоимость ко всем имеющимся у пациентов патологиям</i>						
Консультации (все)	Дообследования (все)	Наблюдения в динамике (все)	Стоимость			
			Суммарная (все)	Консультации (все)	Дообследования (все)	Наблюдения в динамике (все)
Консультации кардиолога, эндокринолога	Стресс-ЭКГ, определение активности ЩФ, ОАК, исследование уровня кальция, УЗИ ОБП, КТ-коронарография, стресс-Эхо, исследование гормональной активности опухоли надпочечника, ЭхоКГ, биохимический анализ крови, КТ с внутривенным контрастированием	КТ в динамике, консультация эндокринолога	91 095 руб./ \$1191,6/ 8195,98 CNY	7800 руб./ \$102,03/ 701,78 CNY	71 795 руб./ \$939,14/ 6459,52 CNY	11 500 руб./ \$150,43/ 1034,68 CNY
<i>Рекомендации и стоимость только к тем патологиям, которые были пропущены врачами и найдены алгоритмом</i>						
Консультации	Дообследования	Наблюдения в динамике	Стоимость			
-	Стресс-ЭКГ, КТ-коронарография, стресс-Эхо, исследование гормональной активности опухоли надпочечника, ЭхоКГ, КТ с внутривенным контрастированием	КТ в динамике	65 300 руб./ \$854,18/ 5875,16 CNY	0	57 700 руб./ \$754,76/ 5191,37 CNY	7600 руб./ \$99,41/ 683,79 CNY

Таблица 8. Окончание

Рекомендации и стоимость только к патологиям, найденным врачами						
Консультации	Дообследования	Наблюдения в динамике	Стоимость			
			Суммарная	Консультации	Дообследования	Наблюдения в динамике
Консультации кардиолога, эндокринолога	Определение активности ЩФ, ОАК, исследование уровня кальция, УЗИ органов брюшной полости, биохимический анализ крови	Консультация эндокринолога	25 795 руб./ \$337,42/ 2320,82 CNY	7800 руб./ \$102,03/ 701,78 CNY	14 095 руб./ \$184,37/ 1268,15 CNY	3900 руб./ \$51,02/ 350,89 CNY

Примечание. ЩФ — щелочная фосфатаза; ОАК — общий анализ крови; УЗИ ОБП — ультразвуковое исследование органов брюшной полости; КТ — компьютерная томография; ЭхоКГ — эхокардиография.

Таблица 9. Итоговые результаты по количеству протоколов со значимыми и незначимыми пропусками

№ врача	Общее количество написанных протоколов	Количество протоколов с незначимыми пропусками (%)	Количество протоколов со значимыми пропусками (%)	Общее количество протоколов со значимыми и незначимыми пропусками (%)
Врач № 2	58	33 (56,9)	28 (48,3)	47 (81)
Врач № 5	23	7 (30,4)	9 (39,1)	11 (39,1)
Врач № 3	23	7 (30,4)	7 (30,4)	13 (56,5)
Врач № 1	16	2 (12,5)	3 (18,7)	5 (31)
Врач № 6	20	1 (5)	1 (5)	2 (10)
Врач № 7	18	1 (5,5)	1 (5,5)	2 (11,1)
Врач № 4	2	1 (50)	1 (50)	1 (50)
Всего	160	52 (32,5)	50 (31,2)	81 (50,6)

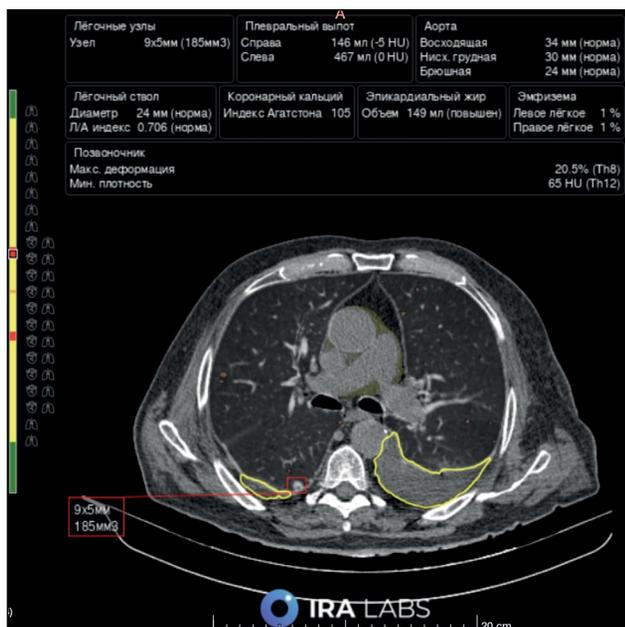


Рис. 6. Пример работы алгоритма искусственного интеллекта. Пациент Б., 76 лет. Врач корректно выявил двусторонний гидроторакс и эмфизематозные изменения, однако не описал лёгочный узел в правом лёгком. Алгоритм искусственного интеллекта выявил все 3 патологии: гидроторакс оконтурен жёлтой линией, эмфизематозные изменения выделены оранжевым цветом, лёгочный узел обозначен красным квадратом.

данных КТ ОГК. В основе предполагаемого экономического эффекта лежит оценка СНМУ.

Медицинские услуги необходимо оказывать пациентам согласно актуальным клиническим рекомендациям. Суммарная СНМУ «второго этапа» необходимой диагностики только для тех патологий, которые были пропущены врачами, но выявлены ИИ, составила чуть более 2 млн руб., или в 3,6 раз больше стоимости за медицинские услуги, которые могли быть оказаны в клинике в соответствии только с находками, выявленными врачами, у 160 пациентов по данным КТ ОГК. По результатам использованной модели расчёта, СНМУ только от значимых пропусков составила чуть более 770 тыс. руб. согласно прайс-листу медицинской организации, или на 98% больше, чем стоимость медицинских услуг, которую могли принести врачи медицинской организации благодаря выявлению случайных находок.

Дополнительно показана возможность использования комплексного программного продукта на основе технологии ИИ для аудита протоколов описаний КТ.

Обсуждение основного результата исследования

Анализ социально-экономического бремени пандемии COVID-19 может служить примером значимых социальных и экономических последствий того или иного массового

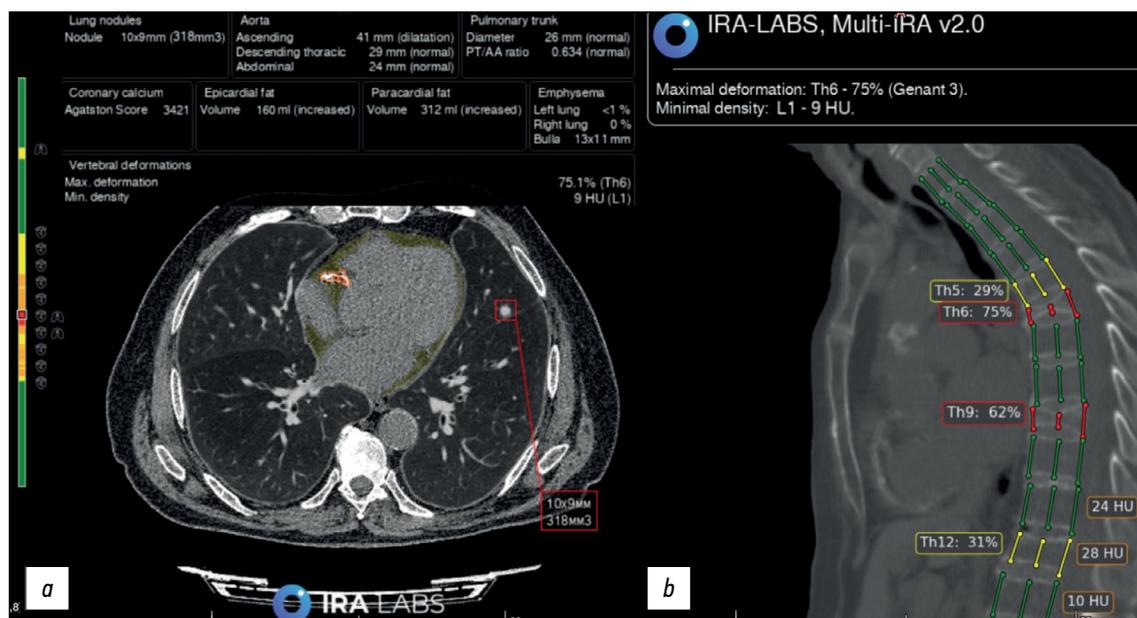


Рис. 7. Пример работы алгоритма искусственного интеллекта. Пациент В., 79 лет. Компьютерная томография органов грудной клетки: *a* — аксиальный срез: врач и алгоритм корректно выявили лёгочный узел в левом лёгком (обозначен красным квадратом) и коронарный кальциноз (оконтурен оранжевой линией); дополнительно алгоритм обозначил увеличение объёма эпикардального жира (залито жёлтым цветом, в исследовании данная патология не учитывалась); *b* — сагиттальный срез: врач и алгоритм корректно выявили компрессионные переломы тел Th6 и Th9 позвонков, Genant 3 (3 колонны обозначены красными линиями), однако врач в протоколе не указал деформации тел Th5 и Th12 позвонков, Genant 2 (3 колонны обозначены жёлтыми линиями).

заболевания для системы здравоохранения РФ и общества в целом, что акцентирует внимание не только на клинической, но и на экономической важности инвестиций в разработку стратегий борьбы с заболеваниями [32]. По оценкам экспертов, социально-экономическое бремя COVID-19 в РФ за 2020 год составило около 5,4 трлн рублей (5% от номинального объёма ВВП в 2020 году), что соответствует 2486,30 YLL (англ. years of life lost — сумма потерянных лет жизни из-за преждевременной смертности населения) среди мужчин и 1378,22 YLL среди женщин [32]. Экономическое бремя неинфекционных заболеваний в РФ за тот же год составило 4 трлн рублей, при этом ущерб от хронических заболеваний сопоставим с бюджетом всего здравоохранения РФ, а средства, которые можно высвободить за счёт эффективной профилактики, могли бы стать колоссальным дополнительным ресурсом для развития страны⁷.

В доступной литературе мы не нашли исследований, оценивающих влияние комплексных систем ИИ для анализа КТ ОГК на экономические аспекты работы медицинской организации.

Р. J. Pickhardt с соавт. [33] построили модель экономической и клинической эффективности скрининга на основе комплексного ИИ с использованием КТ для органов брюшной полости. Используя ожидаемую распространённость заболеваний, вероятности перехода между состояниями

здоровья, связанные с ними затраты на здравоохранение и эффективность лечения трёх заболеваний (сердечно-сосудистые заболевания, остеопороз и саркопения), были оценены 3 взаимоисключающие модели скрининга: (1) игнорирование результатов («не лечить»; никаких вмешательств независимо от результатов КТ); (2) универсальная терапия статинами («лечить всех» для профилактики сердечно-сосудистых заболеваний без учёта результатов КТ); (3) оппортунистический скрининг сердечно-сосудистых заболеваний, остеопороза и саркопении с помощью КТ брюшной полости, выявленных на основе ИИ (целевое лечение лиц групп риска). Для базовых сценариев для групп 55-летних мужчин и женщин, смоделированных в течение 10 лет, оппортунистический скрининг на основе КТ с помощью ИИ был экономичной и более эффективной клинической стратегией, чем подходы «игнорировать» и «лечить всех». Авторы резюмируют, что оппортунистический скрининг на основе КТ с помощью ИИ представляется высококоррелябельной и клинически эффективной стратегией при широком наборе входных допущений и в большинстве сценариев обеспечивает экономию средств. Однако в сравнении с нашим исследованием реально работающий комплексный ИИ представлен не был. Кроме того, в нашей работе использовался комплексный ИИ, направленный на 10 целевых патологий, по сравнению с тремя в упомянутой работе. В связи с этим есть надежда

⁷ Медвестник [интернет]. Экономическое бремя неинфекционных заболеваний в России выросло за два года на триллион рублей [цит.: 04.06.2021]. Режим доступа: <https://medvestnik.ru/content/news/Ekonomicheskoe-bremya-neinfekcionnyh-zabolevanii-v-Rossii-vyroslo-za-dva-goda-na-trillion-rublei.html>.

на повышение потенциала экономической эффективности применения ИИ в сочетании с его положительным влиянием на диагностику.

В единичных публикациях изучался экономический эффект подобных программ при использовании комплексного подхода для нескольких патологий без применения систем ИИ. Так, для Нидерландов было рассчитано, что комплексный низкодозный КТ-скрининг трёх заболеваний, таких как рак лёгкого, хроническая обструктивная болезнь лёгких и сердечно-сосудистые заболевания у лиц в возрасте от 50 до 75 лет, может быть экономически эффективен, если он будет стоить менее 971 евро на одного обследованного человека [34]. В пятилетнем исследовании по данным почти 7,5 тыс. низкодозных КТ было определено, что внелёгочные злокачественные опухоли, случайно выявленные во время скрининга рака лёгкого, имели ранние стадии и благоприятный исход, а дополнительные обследования требовали гораздо меньших затрат, чем в случаях с более поздними стадиями [35]. По мнению авторов, проведённый анализ затрат на дополнительные диагностические и лечебные мероприятия, связанные с выявленными внелёгочными изменениями в ходе низкодозного КТ-скрининга рака лёгкого, является одним из основных этапов доказательства экономической эффективности подобных мероприятий. Такой подход (хотя и ограниченный скрининг рака лёгкого с помощью КТ ОГК) позволяет предлагать применение именно комплексного ИИ для повышения диагностической и экономической эффективности исследований.

В нашем исследовании также был использован комплексный ИИ для поиска 10 патологий. Такие анализы, называемые анализом запаса, оказались полезными для принятия обоснованных решений о дальнейших исследованиях [36–38]. Они являются предпочтительными во время диагностического вмешательства и разработки доказательств для оптимизации сбора данных и более точной оценки долгосрочного экономического воздействия на здоровье, когда становится доступен большой объём клинических данных.

До пандемии COVID-19 алгоритмы ИИ использовались для выявления рентгенологических симптомов с целью обнаружения заболеваний, классификации, оптимизации изображений, снижения дозы лучевой нагрузки и улучшения рабочего процесса [39]. Медицинские исследования эффективности применения ИИ делают такие программы более понятными, безопасными, эффективными и интегрированными в рабочие процессы врачей [40]. В настоящее время идут исследования в рамках проекта IMALife, изучающие снижение смертности не только от рака лёгкого, но и от последствий эмфиземы (биомаркер хронической обструктивной болезни лёгких) и коронарного кальциноза (биомаркер атеросклероза) [41].

Оценка эффективности применения ИИ до настоящего времени встречалась только в алгоритмах ИИ, предназначенных для поиска лишь одной целевой патологии.

В исследовании S. Ziegelmaier и колл. [42] в базовом сценарии КТ+ИИ был показан отрицательный коэффициент дополнительной эффективности затрат (incremental cost-effectiveness ratio, ICER) по сравнению с КТ, демонстрируя более низкие затраты и более высокую эффективность. Пороговый анализ показал, что ICER оставался отрицательным до порога в \$68 для поддержки применения ИИ. Так, использование моносистемы анализа данных низкодозной КТ с помощью ИИ для скрининга рака лёгкого является разумной диагностической стратегией с точки зрения экономической эффективности.

Постоянно растущий объём лучевых исследований создаёт дополнительную нагрузку на врача-рентгенолога [43]. Избыточная нагрузка может увеличить вероятность ошибок и поставить под угрозу качество оказания медицинской помощи [44]. Система аудита с ретроспективным двойным пересмотром исследований широко распространена в лучевой диагностике. Наиболее известной является система RADPEER system Американского общества рентгенологов [45]. Однако, согласно исследованию P.M. Lauritzen с соавт. [46], двойное чтение 1/3 исследований, выполненных в их учреждении, занимает около 20–25% рабочего времени врачей. Использование алгоритмов ИИ может значительно сократить время на пересмотр исследований и увеличить объём и качество аудита, при этом важным условием является минимальное количество ложноположительных ошибок алгоритмов. Применение ИИ также влияло на качество работы врачей-рентгенологов в виде изменения соотношения степени тяжести поражений лёгких при подозрении на COVID-19 в сторону сокращения удельного веса тяжёлой и критической оценки степени тяжести поражения лёгких [47].

В нашем исследовании мы также продемонстрировали возможность использования комплексного ИИ для аудита описаний исследований и выявили более 28% протоколов со значимыми и 27% протоколов с незначимыми пропусками патологий. Следует отметить, что для всех КТ-исследований врачи-рентгенологи медицинской организации в своих протоколах дали ответы на основные диагностические задачи, ради которых пациенты были направлены на сканирование. Врачи медицинской организации, на базе которой проводилось исследование, не имели на всех рабочих станциях инструментов для быстрого измерения индекса Agatston, а измерение плотности тел позвонков не входило в стандарт описания исследований в данном отделении лучевой диагностики. Кроме того, было показано, что средний процент ошибок сопоставим между врачами, поэтому увольняя 1–2 врачей с худшими результатами описаний по данным аудитов, клиника не решит проблему пропуска патологий.

В данной работе при расчёте экономического эффекта не учитывалась стоимость затрат на ИИ, а также стоимость работы, выполненной экспертами по валидации результатов ИИ. Стоимость этих расходов переменна в зависимости от количества алгоритмов, уровня

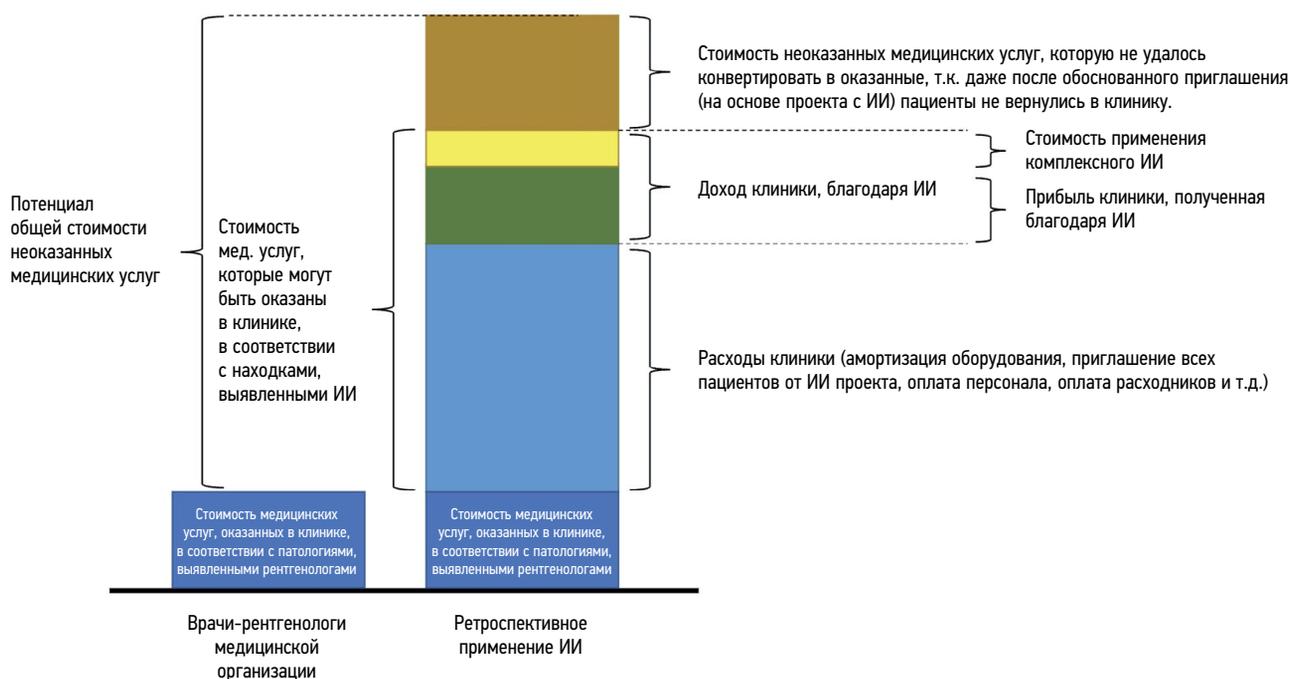


Рис. 8. Потенциал стоимости неоказанных медицинских услуг из-за отсутствия применения комплексного искусственного интеллекта для компьютерной томографии органов грудной клетки в медицинской организации с учётом расходов на использование искусственного интеллекта (ИИ).

привлекательных экспертов и других факторов. Экономически эффективным будет любой тариф на услугу по применению комплексного ИИ при условии, что суммарные затраты будут ниже, чем получение прибыли медицинской организацией, благодаря применению ИИ (рис. 8). Однако такой анализ выходит за рамки текущего исследования.

Ограничения исследования

Данное исследование является пилотным и имеет ряд ограничений.

Так, исследование имеет ретроспективный дизайн и оценивает максимальный потенциал СНМУ частной медицинской организации, обоснованной рекомендациями, следующими за патологическими находками. На практике не все пациенты склонны прислушиваться к врачам и выполнять обоснованные рекомендации, тем более в тех случаях, когда речь идёт о платных дообследованиях и консультациях. Кроме того, конверсия в каждой клинике имеет свои особенности, выходящие за пределы дизайна текущего исследования.

В цели настоящего исследования входила лишь оценка стоимости «второго этапа» без стоимости «третьего» и последующих этапов, т.е. не учитывалась стоимость лечения и реабилитации. Однако почти для каждой патологии, которую способен выявить используемый комплексный ИИ, стоимость лечения значительно превосходит стоимость «второго этапа». В каждой медицинской организации есть множество факторов, влияющих на качество работы врачей. Показатель качества работы врачей (количество пропусков клинически значимых рентгенологических находок) может быть переменным в зависимости

от стажа врачей-рентгенологов, количества исследований в день, времени суток, дня недели и многих других дополнительных показателей, способных повлиять на знания, внимательность и готовность врача-рентгенолога внести в протокол все патологические находки и обоснованные рекомендации для «второго этапа».

В нашей работе не оценивался потенциал ложноположительных находок ИИ, так как используемый комплексный ИИ валидирован при независимых тестированиях на закрытых датасетах Московского эксперимента, и выбранные настройки ИИ были признаны приемлемыми и откалиброванными для работы.

В цели данного исследования не входила оценка экономического эффекта на уровне городского и федерального здравоохранения, однако каждая медицинская организация в РФ не лишена возможности проведения платных медицинских услуг населению, обоснованных с точки зрения принципов доказательной медицины.

В нашем исследовании не изучалась комплаентность пациентов по приглашениям на основе ретроспективного анализа, при этом выявленные находки тесно связаны с временными интервалами между проведением КТ-исследования и «вторым этапом».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение комплексного ИИ для анализа данных КТ ОГК в качестве помощника врача-рентгенолога с целью диагностики 10 распространённых и важных видов патологических находок приводит к улучшению их выявления. Важно, что потенциал СНМУ для «второго этапа» при таком

подходе в 3,6 раза больше по сравнению со стандартной моделью работы врачей-рентгенологов без помощи ИИ.

Опportunистический скрининг нескольких заболеваний требует детального изучения сопутствующих заболеваний для определения оптимальной целевой группы диагностического вмешательства с помощью комплексного ИИ. Высока вероятность того, что применение комплексного ИИ для КТ ОГК будет рентабельным, так как при таком подходе выявляется большое количество значимых патологических изменений, требующих дополнительных медицинских услуг.

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). Наибольший вклад распределён следующим образом: В.Ю. Чернина — поиск публикаций по теме статьи, формирование набора данных, написание текста рукописи; М.Г. Беляев — экспертная оценка информации, редактирование текста рукописи; А.Ю. Силин — концепция исследования; И.А. Пятницкий — редактирование текста рукописи; перевод текста на английский язык; И.О. Аветисов, Е.А. Петраш — редактирование текста рукописи; М.В. Басова — формирование набора данных, обработка результатов исследования; В.Е. Сеницын — экспертная оценка информации, редактирование текста рукописи; В.В. Омеляновский — экспертная оценка информации; В.А. Гомболевский — концепция исследования, экспертная оценка информации, написание текста рукописи, утверждение финальной версии рукописи.

Благодарности. Коллектив авторов выражает благодарность Писову Максиму Евгеньевичу, техническому директору компании «АЙРА Лабс», и команде разработчиков (Проскурову В.А., Самойленко А.И., Борзову А.С., Бухараеву А.Н., Гончарову М.Ю., Широких Б.Н., Курмукову А.И., Начинкину И.А., Телепову А.Ю., Шимоволос С.А., Донсковой М.А., Самохину В.Ю., Шевцову А.Е., Яушев Ф., Ткаченко С.М., Захарову А.А., Сапарову Т.Н., Филипенко В.К., Томинину В.Д., Томинину Я.Д., Самойленко А.И., Малеванному В.М., Леонову А.Ю., Ногиной Д.С., Базаровой А.И.,

Мараховскому К.В., Белкову А.С., Васину А.А., Бережной Д.С., Мусихину М.М.); Дуговой Марии Николаевне, медицинскому директору, и команде медицинских экспертов (Ильичевой Д.В., Севрюкову Д.Д., Щипахиной Я.А., Любимой Ю.О., Алешинной О.О., Цыбульской Ю.А.); Ламзину Михаилу Сергеевичу, операционному директору, Гареевой Регине Рустемовне, продакт-менеджеру компании, и Паниной Елене Вячеславовне, заместителю директора по развитию бизнеса.

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. The authors confirm that their authorship complies with the international ICMJE criteria (all authors contributed significantly to developing the concept, research, and preparation of the article and read and approved the final version before publication). Chernina V.Yu. — search for publications on the article's topic, formation of a data set, writing the text of the manuscript; Belyaev M.G. — expert evaluation of the data, manuscript's text editing; Silin A.Yu. — the concept of the study; Pyatnitskiy I.A. — manuscript's text editing; English text translation; Avetisov I.O., Petrash E.A. — manuscript's text editing; Basova M.V. — formation of a data set, processing of research results; Sinityn V.E. — expert evaluation of the data, manuscript's text editing; Omelyanovsky V.V. — expert evaluation data; Gombolevsky V.A. — the concept of the study, expert evaluation of data, manuscript's text writing, approval of the final version.

Acknowledgments. The authors' team would like to gratefully acknowledge Maksim E. PISOV, Technical Director of IRA Labs, and the development team (Proskurov V.A., Samoilenko A.I., Borzov A.S., Bukharaev A.N., Goncharov M.Y., Shirokikh B.N., Kurmukova A.I., Nachinkin I.A., Telepov A.Y., Shimovolos S.A., Donskova M.A., Samokhin V.Y., Shevtsova A.E., Yaushev F., Tkachenko S.M., Zakharov A.A., Saparov T.N., Filipenko V.K., Tomin V.D., Tomin J.D., Samoilenko A.I., Malevannu V.M., Leonov A.Yu., Nogova D.S., Bazarova A.I., Marakhovsky K.V., Belkov A.S., Vasin A.A., Berezhnaya D.S., Musikhin M.M.); Maria N. Dugova, Medical Director, and the team of medical experts (Ilyicheva D.V., Sevrukov D.D., Shchepakina Y.A., Lyubimaya Y.O., Aleshina O.O., Tsybul'skaya Y.A.); Mikhail S. Lamzin, Chief Operating Officer; Regina R. Gareeva, Product Manager, and Elena V. Panina, Deputy Director for Business Development.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aberle D.R., Adams A.M., Berg C.D., et al.; National Lung Screening Trial Research Team. Reduced lung-cancer mortality with low-dose computed tomographic screening // *N Engl J Med*. 2011. Vol. 365, N 5. P. 395–409. doi: 10.1056/NEJMoa1102873
2. Pastorino U., Silva M., Sestini S., et al. Prolonged lung cancer screening reduced 10-year mortality in the MILD trial: New

confirmation of lung cancer screening efficacy // *Ann Oncol*. 2019. Vol. 30, N 7. P. 1162–1169. doi: 10.1093/annonc/mdz117

3. Grover H., King W., Bhattarai N., et al. Systematic review of the cost-effectiveness of screening for lung cancer with low dose computed tomography // *Lung Cancer*. 2022. N 170. P. 20–33. doi: 10.1016/j.lungcan.2022.05.005

4. Николаев А.Е., Гомболевский В.А., Гончар А.П., и др. Случайные находки при скрининге рака легкого методом низкодозной компьютерной томографии // Туберкулез и болезни лёгких. 2018. Т. 96, № 11. С. 60–67. doi: 10.21292/2075-1230-2018-96-11-60-67
5. Kilsdonk I.D., de Roos M.P., Bresser P., et al. Frequency and spectrum of incidental findings when using chest CT as a primary triage tool for COVID-19 // *Eur J Radiol Open*. 2021. N 8. P. 100366. doi: 10.1016/j.ejro.2021.100366
6. Бельцевич Д.Г., Мельниченко Г.А., Кузнецов Н.С., и др. Клинические рекомендации Российской ассоциации эндокринологов по дифференциальной диагностике инцидентом надпочечников // *Эндокринная хирургия*. 2016. Т. 10, № 4. С. 31–42. doi: 10.14341/serg2016431-42
7. Эмфизема легких. Клинические рекомендации (утв. Министерством здравоохранения РФ, 2021). Режим доступа: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/402775957/>. Дата обращения: 17.03.2023.
8. Аневризмы грудной и торакоабдоминальной аорты. Клинические рекомендации (утв. Министерством здравоохранения РФ, 2023). Режим доступа: https://www.angiolsurgery.org/library/recommendations/2022/aneurysms_thoracic_thoracoabdominal_aorta/recommendation.pdf. Дата обращения: 17.03.2023.
9. Васильев Ю.А., Владимирский А.В., Арзамасов К.М., и др. Компьютерное зрение в лучевой диагностике: первый этап Московского эксперимента. Монография. 2-е изд., перераб. и доп. / под ред. Ю.А. Васильева, А.В. Владимирского. Москва: Издательские решения, 2023. 376 с.
10. Zakharov A., Pisov M., Bukharaev A., et al. Interpretable vertebral fracture quantification via anchor-free landmarks localization // *Med Image Anal*. 2023. N 83. P. 102646. doi: 10.1016/j.media.2022.102646
11. Goncharov M., Pisov M., Shevtsov A., et al. CT-Based COVID-19 triage: Deep multitask learning improves joint identification and severity quantification // *Med Image Anal* // 2021. N 71. P. 102054. doi: 10.1016/j.media.2021.102054
12. Shirokikh B., Shevtsov A., Dalechina A., et al. Accelerating 3D medical image segmentation by adaptive small-scale target localization // *J Imaging*. 2021. Vol. 13, N 7. P. 35. doi: 10.3390/jimaging7020035
13. Goncharov M., Pisov M., Belyaev M., et al. Quantification of epicardial adipose tissue in low-dose computed tomography images // *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2022. Vol. 784, N 1. P. 98–107. doi: 10.1007/978-981-16-3880-0_11
14. Husereau D., Drummond M., Augustovski F., et al.; CHEERS 2022 ISPOR Good Research Practices Task Force. Consolidated health economic evaluation reporting standards 2022 (cheers 2022) statement: Updated reporting guidance for health economic evaluations // *Value Health*. 2022. Vol. 25, N 1. P. 3–9. doi: 10.1016/j.jval.2021.11.1351
15. Морозов С.П., Владимирский А.В., Кляшторный В.Г., и др. Клинические испытания программного обеспечения на основе интеллектуальных технологий (лучевая диагностика). Препринт № ЦДТ-2019-1. Серия «Лучшие практики лучевой и инструментальной диагностики». Вып. 23. Москва: ГБУЗ НПКЦ ДиТ ДЗМ, 2019. 33 с.
16. Гомболевский В.А., Блохин И.А., Лайпан А.Ш., и др. Методические рекомендации по скринингу рака легкого. Серия «Лучшие практики лучевой и инструментальной диагностики». Вып. 56. Москва: ГБУЗ НПКЦ ДиТ ДЗМ, 2020. 57 с.
17. Морозов С.П., Проценко Д.Н., Сметанина С.В., и др. Лучевая диагностика коронавирусной болезни (COVID-19): организация, методология, интерпретация результатов: методические рекомендации. Серия «Лучшие практики лучевой и инструментальной диагностики». Вып. 65. Москва: ГБУЗ НПКЦ ДиТ ДЗМ, 2020. 78 с.
18. Временные методические рекомендации. Профилактика, диагностика и лечение новой коронавирусной инфекции (COVID-19). Министерство здравоохранения Российской Федерации. Версия 17 (14.12.2022). Режим доступа: https://static-0.minzdrav.gov.ru/system/attachments/attaches/000/061/254/original/%D0%92%D0%9C%D0%A0_COVID-19_V17.pdf?1671088207. Дата обращения: 17.03.2023.
19. Lynch D.A., Austin J.H., Hogg J.C., et al. CT-definable subtypes of chronic obstructive pulmonary disease: A statement of the Fleischner Society // *Radiology*. 2015. Vol. 277, N 1. P. 192–205. doi: 10.1148/radiol.2015141579
20. Hersh C.P., Washko G.R., Estépar R.S., et al. Paired inspiratory-expiratory chest CT scans to assess for small airways disease in COPD // *Respir Res*. 2013. Vol. 146, N 1. P. 42. doi: 10.1186/1465-9921-14-42
21. Walker C., Chung J.H. Muller's imaging of the chest e-book: Expert radiology series. Elsevier Health Sciences, 2018. 1104 p.
22. Erbel R., Aboyans V., Boileau C., et al.; ESC Committee for Practice Guidelines. 2014 ESC Guidelines on the diagnosis and treatment of aortic diseases: Document covering acute and chronic aortic diseases of the thoracic and abdominal aorta of the adult. The Task Force for the Diagnosis and Treatment of Aortic Diseases of the European Society of Cardiology (ESC) // *Eur Heart J*. 2014. Vol. 35, N 41. P. 2873–2926. doi: 10.1093/eurheartj/ehu281
23. Wanhainen A., Verzini F., Van Herzele I., et al. Clinical practice guidelines on the management of abdominal aorto-iliac artery aneurysms6 // *Eur J Vascul Endovasc Sur*. 2019. Vol. 57, N 1. P. 8–93. doi: 10.1016/j.ejvs.2018.09.020
24. Jurgens P.T., Carr J.J., Terry J.G., et al. Association of abdominal aorta calcium and coronary artery calcium with incident cardiovascular and coronary heart disease events in black and white middle-aged people: The coronary artery risk development in young adults study // *J Am Heart Assoc*. 2021. Vol. 10, N 24. P. 23–37. doi: 10.1161/JAHA.121.023037
25. Galìè N., Humbert M., Vachiery J.L., et al. 2015 ESC/ERS Guidelines for the diagnosis and treatment of pulmonary hypertension: The joint task force for the diagnosis and treatment of pulmonary hypertension of the European society of cardiology (ESC) and the European respiratory society (ERS): Endorsed by: Association for European paediatric and congenital cardiology (AEPC), international society for heart and lung transplantation (ISHLT) // *Eur Respir J*. 2015. Vol. 46, N 4. P. 903–975. doi: 10.1183/13993003.01032-2015
26. Agatston A.S., Janowitz W.R., Hildner F.J., et al. Quantification of coronary artery calcium using ultrafast computed tomography // *J Am Coll Cardiol*. 1990. Vol. 15, N 4. P. 827–832. doi: 10.1016/0735-1097(90)90282-t
27. Журавлев К.Н. КТ-коронарография. Серия «Лучшие практики лучевой и инструментальной диагностики». Вып. 65. Москва: ГБУЗ НПК ЦДиТ ДЗМ, 2020. 35 с.
28. Mayo-Smith W.W., Song J.H., Boland G.L., et al. Management of incidental adrenal masses: A white paper of the ACR incidental findings committee // *J Am Coll Radiol*. 2017. Vol. 14, N 8. P. 1038–1044. doi: 10.1016/j.jacr.2017.05.001

29. Белая Ж.Е., Белова К.Ю., Бирюкова Е.В., и др. Федеральные клинические рекомендации по диагностике, лечению и профилактике остеопороза // Остеопороз и остеопатии. 2021. Т. 24, № 2. С. 4–47. doi: 10.14341/osteo12930
30. Genant H.K., Jergas M. Assessment of prevalent and incident vertebral fractures in osteoporosis research // *Osteoporosis Int.* 2003. Vol. 14, N 3. P. 43–55. doi: 10.1007/S00198-002-1348-1
31. Патологические переломы, осложняющие остеопороз. Клинические рекомендации. Москва, 2018. 90 с. Режим доступа: <https://neirodoc.ru/wp-content/uploads/2019/10/patologicheskie-perelomy-oslozhnyayuschie-osteoporoz-2018.pdf>. Дата обращения: 17.03.2023.
32. Колбин А.С., Гомон Ю.М., Балыкина Ю.Е., и др. Социально-экономическое и глобальное бремя COVID-19 // *Качественная клиническая практика.* 2021. № 1. С. 24–34. doi: 10.37489/2588-0519-2021-1-24-34
33. Pickhardt P.J., Correale L., Hassan C. AI-based opportunistic CT screening of incidental cardiovascular disease, osteoporosis, and sarcopenia: Cost-effectiveness analysis // *Abdom Radiol (NY).* 2023. N 3. P. 1181–1198. doi: 10.1007/s00261-023-03800-9
34. Behr C.M., Koffijberg H., Degeling K., et al. Can we increase efficiency of CT lung cancer screening by combining with CVD and COPD screening? Results of an early economic evaluation // *Eur Radiol.* 2022. Vol. 32, N 5. P. 3067–3075. doi: 10.1007/s00330-021-08422-7
35. Chintanapakdee W., Mendoza D.P., Zhang E.W., et al. Detection of extrapulmonary malignancy during lung cancer screening: 5-year analysis at a tertiary hospital // *J Am Coll Radiol.* 2020. Vol. 17, N 12. P. 1609–1620. doi: 10.1016/j.jacr.2020.09.032
36. Girling A., Lilford R., Cole A., et al. Headroom approach to device development: Current and future directions // *Int J Technol Assess Health Care.* 2015. Vol. 31, N 5. P. 331–338. doi: 10.1017/S0266462315000501
37. Ijzerman M.J., Steuten L.M. Early assessment of medical technologies to inform product development and market access: A review of methods and applications // *Appl Health Econ Health Policy.* 2011. Vol. 9, N 5. P. 331–347. doi: 10.2165/11593380-000000000-00000
38. Ijzerman M.J., Koffijberg H., Fenwick E., et al. Emerging use of early health technology assessment in medical product development: A scoping review of the literature // *Pharmacoeconomics.* 2017. Vol. 35, N 7. P. 727–740. doi: 10.1007/s40273-017-0509-1
39. Sahiner B., Pezeshk A., Hadjiiski L.M., et al. Deep learning in medical imaging and radiation therapy // *Med Phys.* 2019. Vol. 46, N 1. P. 1–36. doi: 10.1002/mp.13264
40. Allen B.J., Seltzer S.E., Langlotz C.P., et al. A road map for translational research on artificial intelligence in medical imaging: From the 2018 national institutes of health/RSNA/ACR/The academy workshop // *J Am Coll Radiol.* 2019. Vol. 16, N 9. P. 1179–1189. doi: 10.1016/j.jacr.2019.04.014
41. Xia C., Rook M., Pelgrim G.J., et al. Early imaging biomarkers of lung cancer, COPD and coronary artery disease in the general population: Rationale and design of the ImaLife (Imaging in Lifelines) Study // *Eur J Epidemiol.* 2020. Vol. 35, N 1. P. 75–86. doi: 10.1007/s10654-019-00519-0
42. Ziegelmayer S., Graf M., Makowski M., et al. Cost-effectiveness of artificial intelligence support in computed tomography-based lung cancer screening // *Cancers (Basel).* 2022. Vol. 14, N 7. P. 1729. doi: 10.3390/cancers14071729
43. McDonald R.J., Schwartz K.M., Eckel L.J., et al. The effects of changes in utilization and technological advancements of cross-sectional imaging on radiologist workload // *Acad Radiol.* 2015. Vol. 22, N 9. P. 1191–1198. doi: 10.1016/j.acra.2015.05.007
44. Sokolovskaya E., Shinde T., Ruchman R.B., et al. The effect of faster reporting speed for imaging studies on the number of misses and interpretation errors: A pilot study // *J Am Coll Radiol.* 2015. Vol. 12, N 7. P. 683–688. doi: 10.1016/j.jacr.2015.03.040
45. Geijer H., Geijer M. Added value of double reading in diagnostic radiology, a systematic review // *Insights Imaging.* 2018. Vol. 9, N 3. P. 287–301. doi: 10.1007/s13244-018-0599-0
46. Lauritzen P.M., Hurlen P., Sandbæk G., et al. Double reading rates and quality assurance practices in Norwegian hospital radiology departments: Two parallel national surveys // *Acta Radiol.* 2015. Vol. 56, N 1. P. 78–86. doi: 10.1177/0284185113519988
47. Морозов С.П., Чернина В.Ю., Андрейченко А.Е., и др. Как искусственный интеллект влияет на оценку поражения лёгких при COVID-19 по данным КТ грудной клетки? // *Digital Diagnostics.* 2021. Т. 2, № 1. С. 27–38. doi: 10.17816/DD60040

REFERENCES

1. Aberle DR, Adams AM, Berg CD, et al.; National Lung Screening Trial Research Team. Reduced lung-cancer mortality with low-dose computed tomographic screening. *N Engl J Med.* 2011;365(5):395–409. doi: 10.1056/NEJMoa1102873
2. Pastorino U, Silva M, Sestini S, et al. Prolonged lung cancer screening reduced 10-year mortality in the MILD trial: new confirmation of lung cancer screening efficacy. *Ann Oncol.* 2019;30(7):1162–1169. doi: 10.1093/annonc/mdz117
3. Grover H, King W, Bhattarai N, et al. Systematic review of the cost-effectiveness of screening for lung cancer with low dose computed tomography. *Lung Cancer.* 2022;170:20–33. doi: 10.1016/j.lungcan.2022.05.005
4. Nikolaev AE, Gombolevskiy VA, Gonchar AP, et al. Incidental findings during lung cancer screening by low-dose computed tomography. *Tuberculosis Lung Dis.* 2018;96(11):60–67. (In Russ). doi: 10.21292/2075-1230-2018-96-11-60-67
5. Kilsdonk ID, de Roos MP, Bresser P, et al. Frequency and spectrum of incidental findings when using chest CT as a primary triage tool for COVID-19. *Eur J Radiol Open.* 2021;(8):100366. doi: 10.1016/j.ejro.2021.100366
6. Beltsevich DG, Melnichenko GA, Kuznetsov NS, et al. Russian Association of Endocrinologists clinical practice guideline for adrenal incidentalomas differential diagnosis. *Endocrine Sur.* 2016;10(4):31–42. (In Russ). doi: 10.14341/serg2016431-42
7. Emphysema of the lungs. Clinical recommendations (approved by the Ministry of Health of the Russian Federation, 2021). (In Russ). Available from: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/402775957/>. Accessed: 25.08.2021.
8. Thoracic and thoracoabdominal aortic aneurysms. Clinical recommendations (approved by the Ministry of Health of the Russian Federation, 2023). (In Russ). Available from: https://www.angiolsurgery.org/library/recommendations/2022/aneurysms_thoracic_thoracoabdominal_aorta/recommendation.pdf. Accessed: 25.08.2021.
9. Vasiliev YuA, Vladzimirsky AV, Arzamasov KM, et al. Computer vision in radiation diagnostics: the first stage of the Moscow

- experiment. Monograph. 2nd ed., revised and updated. Ed. by Yu.A. Vasiliev, A.V. Vladimirovsky. Moscow: Izdatel'skie resheniya; 2023. 376 p. (In Russ).
10. Zakharov A, Pisov M, Bukharaev A, et al. Interpretable vertebral fracture quantification via anchor-free landmarks localization. *Med Image Anal.* 2023;(83):102646. doi: 10.1016/j.media.2022.102646
11. Goncharov M, Pisov M, Shevtsov A, et al. CT-Based COVID-19 triage: Deep multitask learning improves joint identification and severity quantification. *Med Image Anal.* 2021;(71):102054. doi: 10.1016/j.media.2021.102054
12. Shirokikh B, Shevtsov A, Dalechina A, et al. Accelerating 3D medical image segmentation by adaptive small-scale target localization. *J Imaging.* 2021;7(2):35. doi: 10.3390/jimaging7020035
13. Goncharov M, Pisov M, Belyaev M, et al. Quantification of epicardial adipose tissue in low-dose computed tomography images. *Lecture Notes Electrical Engineering.* 2022;784(1):98–107. doi: 10.1007/978-981-16-3880-0_11
14. Husereau D, Drummond M, Augustovski F, et al.; CHEERS 2022 ISPOR Good Research Practices Task Force. Consolidated health economic evaluation reporting standards 2022 (cheers 2022) statement: Updated reporting guidance for health economic evaluations. *Value Health.* 2022;25(1):3–9. doi: 10.1016/j.jval.2021.11.1351
15. Morozov SP, Vladimirovsky AV, Kljashtorny VG, et al. Clinical trials of software based on intelligent technologies (radiology diagnostics). Preprint № CDT-2019-1. Best Practice in Radiation Oncology and Instrumental Diagnostics. Vol. 23. Moscow: Center for Diagnostics and Telemedicine; 2019. 33 p. (In Russ).
16. Gombolevskiy VA, Blokhin IA, Laipan AS, et al. Methodological guidelines for lung cancer screening. Best Practice in Radiation and Instrumental Diagnostics. Vol. 56. Moscow: Center for Diagnostics and Telemedicine; 2020. 57 p. (In Russ).
17. Morozov SP, Protsenko DN, Smetanina SV, et al. Radiation diagnosis of coronavirus disease (COVID-19): Organization, methodology, interpretation of results: Guidelines. Best Practices in Radiation and Instrumental Diagnostics Series. Vol. 65. Moscow: Center for Diagnostics and Telemedicine; 2020. 78 p. (In Russ).
18. Temporary methodological recommendations. Prevention, diagnosis and treatment of new coronavirus infection (COVID-19). Ministry of Health of the Russian Federation. 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: 17.03.2023.
19. Lynch DA, Austin JH, Hogg JC, et al. CT-definable subtypes of chronic obstructive pulmonary disease: A statement of the Fleischner Society. *Radiology.* 2015;277(1):192–205. doi: 10.1148/radiol.2015141579
20. Hersh CP, Washko GR, Estépar RS, et al. Paired inspiratory-expiratory chest CT scans to assess for small airways disease in COPD. *Respir Res.* 2013;14(1):42. doi: 10.1186/1465-9921-14-42
21. Walker C, Chung JH. Muller's imaging of the chest e-book: Expert radiology series. Elsevier Health Sciences; 2018. 1104 p.
22. Erbel R, Aboyans V, Boileau C et al. ESC Committee for Practice Guidelines. 2014 ESC Guidelines on the diagnosis and treatment of aortic diseases: Document covering acute and chronic aortic diseases of the thoracic and abdominal aorta of the adult. The task force for the diagnosis and treatment of aortic diseases of the European society of cardiology (ESC). *Eur Heart J.* 2014;35(41):2873–2926. doi: 10.1093/eurheartj/ehu281
23. Wanhainen A, Verzini F, Van Herzele I, et al. Clinical practice guidelines on the management of abdominal aorto-iliac artery aneurysms. *Eur J Vascul Endovasc Sur.* 2019;57(1):8–93. doi: 10.1016/j.ejvs.2018.09.020
24. Jurgens PT, Carr JJ, Terry JG, et al. Association of abdominal aorta calcium and coronary artery calcium with incident cardiovascular and coronary heart disease events in black and white middle-aged people: The coronary artery risk development in young adults study. *J Am Heart Assoc.* 2021;10(24):23–37. doi: 10.1161/JAHA.121.023037
25. Galè N, Humbert M, Vachiery JL, et al. 2015 ESC/ERS Guidelines for the diagnosis and treatment of pulmonary hypertension: The joint task force for the diagnosis and treatment of pulmonary hypertension of the European society of cardiology (ESC) and the European respiratory society (ERS): Endorsed by: Association for European paediatric and congenital cardiology (AEPC), international society for heart and lung transplantation (ISHLT). *Eur Respir J.* 2015;46(4):903–975. doi: 10.1183/13993003.01032-2015
26. Agatston AS, Janowitz WR, Hildner FJ et al. Quantification of coronary artery calcium using ultrafast computed tomography. *J Am Coll Cardiol.* 1990;15(4):827–832. doi: 10.1016/0735-1097(90)90282-t
27. Zhuravlev KN. Coronary CT angiography. Best practices in radiation and instrumental diagnostics series. Vol. 65. Moscow: Center for Diagnostics and Telemedicine; 2020. 35 p. (In Russ).
28. Mayo-Smith WW, Song JH, Boland GL, et al. Management of incidental adrenal masses: A white paper of the ACR incidental findings committee. *J Am Coll Radiol.* 2017;14(8):1038–1044. doi: 10.1016/j.jacr.2017.05.001
29. Belaya ZE, Belova KYu, Biryukova EV, et al. Federal clinical guidelines for diagnosis, treatment and prevention of osteoporosis. *Osteoporosis Bone Diseases.* 2021;24(2):4–47. (In Russ). doi: 10.14341/osteol2930
30. Genant HK, Jergas M. Assessment of prevalent and incident vertebral fractures in osteoporosis research. *Osteoporosis Int.* 2003;14(3):43–55. doi: 10.1007/S00198-002-1348-1
31. Pathological fractures complicating osteoporosis. Clinical recommendations. Moscow; 2018. 90 p. (In Russ). Available from: <https://neirodoc.ru/wp-content/uploads/2019/10/patologicheskipeperelomy-oslozhnyayuschie-osteoporoz-2018.pdf>. Accessed: 17.03.2023.
32. Kolbin AS, Gomom YuM, Balykina YuE, et al. Socioeconomic and global burden of COVID-19. *Good Clin Pract.* 2021;(1):24–34. (In Russ). doi: 10.37489/2588-0519-2021-1-24-34
33. Pickhardt PJ, Corrales L, Hassan C. AI-based opportunistic CT screening of incidental cardiovascular disease, osteoporosis, and sarcopenia: Cost-effectiveness analysis. *Abdom Radiol (NY).* 2023;(3):1181–1198. doi: 10.1007/s00261-023-03800-9
34. Behr CM, Koffijberg H, Degeling K, et al. Can we increase efficiency of CT lung cancer screening by combining with CVD and COPD screening? Results of an early economic evaluation. *Eur Radiol.* 2022;32(5):3067–3075. doi: 10.1007/s00330-021-08422-7
35. Chintanapakdee W, Mendoza DP, Zhang EW, et al. Detection of extrapulmonary malignancy during lung cancer screening: 5-year analysis at a tertiary hospital. *J Am Coll Radiol.* 2020;17(12):1609–1620. doi: 10.1016/j.jacr.2020.09.032
36. Girling A, Lilford R, Cole A, et al. Headroom approach to device development: Current and future directions. *Int J Technol Assess Health Care.* 2015;31(5):331–338. doi: 10.1017/S0266462315000501
37. Ijzerman MJ, Steuten LM. Early assessment of medical technologies to inform product development and market access:

A review of methods and applications. *Appl Health Econ Health Policy*. 2011;9(5):331–347. doi: 10.2165/11593380-000000000-00000

38. Izerman MJ, Koffijberg H, Fenwick E, et al. Emerging use of early health technology assessment in medical product development: A scoping review of the literature. *Pharmacoeconomics*. 2017;35(7):727–740. doi: 10.1007/s40273-017-0509-1

39. Sahiner B, Pezeshk A, Hadjiiski LM, et al. Deep learning in medical imaging and radiation therapy. *Med Phys*. 2019;46(1):1–36. doi: 10.1002/mp.13264

40. Allen BJ, Seltzer SE, Langlotz CP, et al. A road map for translational research on artificial intelligence in medical imaging: From the 2018 national institutes of health/RSNA/ACR/The academy workshop. *J Am Coll Radiol*. 2019;16(9):1179–1189. doi: 10.1016/j.jacr.2019.04.014

41. Xia C, Rook M, Pelgrim GJ, et al. Early imaging biomarkers of lung cancer, COPD and coronary artery disease in the general population: rationale and design of the Imalife (Imaging in Lifelines) Study. *Eur J Epidemiol*. 2020;35(1):75–86. doi: 10.1007/s10654-019-00519-0

42. Ziegelmayer S, Graf M, Makowski M, et al. Cost-Effectiveness of artificial intelligence support in computed tomography-

based lung cancer screening. *Cancers (Basel)*. 2022;14(7):1729. doi: 10.3390/cancers14071729

43. McDonald RJ, Schwartz KM, Eckel LJ, et al. The effects of changes in utilization and technological advancements of cross-sectional imaging on radiologist workload. *Acad Radiol*. 2015;22(9):1191–1198. doi: 10.1016/j.acra.2015.05.007

44. Sokolovskaya E, Shinde T, Ruchman RB, et al. The effect of faster reporting speed for imaging studies on the number of misses and interpretation errors: A pilot study. *J Am Coll Radiol*. 2015;12(7):683–688. doi: 10.1016/j.jacr.2015.03.040

45. Geijer H, Geijer M. Added value of double reading in diagnostic radiology, a systematic review. *Insights Imaging*. 2018;9(3):287–301. doi: 10.1007/s13244-018-0599-0

46. Lauritzen PM, Hurlen P, Sandbæk G, et al. Double reading rates and quality assurance practices in Norwegian hospital radiology departments: Two parallel national surveys. *Acta Radiol*. 2015;56(1):78–86. doi: 10.1177/0284185113519988

47. Morozov SP, Chernina VYu, Andreychenko AE, et al. How does artificial intelligence effect on the assessment of lung damage in COVID-19 on chest CT scan? *Digital Diagnostics*. 2020;2(1):27–38. (In Russ). doi: 10.17816/DD60040

ОБ АВТОРАХ

* Чернина Валерия Юрьевна;

адрес: Россия, 121205, Москва, Сколково, Большой б-р, д. 30, стр. 1;
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0302-293X>;
eLibrary SPIN: 8896-8051; e-mail: v.chernina@ira-labs.com

Беляев Михаил Геннадьевич, канд. физ.-мат. наук, профессор;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9906-6453>;
eLibrary SPIN: 2406-1772; e-mail: belyaevmichel@gmail.com

Силин Антон Юрьевич;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4952-2347>;
eLibrary SPIN: 4411-8745; e-mail: silin@yamed.ru

Аветисов Иван Олегович;

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3550-7556>;
e-mail: avetisov@yamed.ru

Пятницкий Илья Аркадьевич;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2827-1473>;
eLibrary SPIN: 6150-4961; e-mail: i.pyatnitskiy@ira-labs.com

Петраш Екатерина Александровна, канд. мед. наук;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6572-5369>;
eLibrary SPIN: 6910-8890; e-mail: e.a.petrash@gmail.com

Басова Мария Васильевна;

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3325-8452>;
e-mail: m.basova@ira-labs.com

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5649-2193>;
eLibrary SPIN: 8449-6590; e-mail: vsini@mail.ru

Омельяновский Виталий Владимирович, д-р мед. наук,

профессор; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1581-0703>;
eLibrary SPIN: 1776-4270; e-mail: vvo@rosmedex.ru

Гомболевский Виктор Александрович, канд. мед. наук;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1816-1315>;
eLibrary SPIN: 6810-3279; e-mail: gombolevskii@gmail.com

AUTHORS' INFO

* Valeria Yu. Chernina;

address: 30/1 Bolshoy Boulevard, 121205 Moscow, Skolkovo, Russia;
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0302-293X>;
eLibrary SPIN: 8896-8051; e-mail: v.chernina@ira-labs.com

Mikhail G. Belyaev, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Professor;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9906-6453>;
eLibrary SPIN: 2406-1772; e-mail: belyaevmichel@gmail.com

Anton Yu. Silin;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4952-2347>;
eLibrary SPIN: 4411-8745; e-mail: silin@yamed.ru

Ivan O. Avetisov;

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3550-7556>;
e-mail: avetisov@yamed.ru

Ilya A. Pyatnitskiy;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2827-1473>;
eLibrary SPIN: 6150-4961; e-mail: i.pyatnitskiy@ira-labs.com

Ekaterina A. Petrash, MD, Cand. Sci. (Med.);

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6572-5369>;
eLibrary SPIN: 6910-8890; e-mail: e.a.petrash@gmail.com

Maria V. Basova;

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3325-8452>;
e-mail: m.basova@ira-labs.com

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5649-2193>;
eLibrary SPIN: 8449-6590; e-mail: vsini@mail.ru

Vitaly V. Omelyanovskiy, MD, Dr. Sci. (Med.), Professor;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1581-0703>;
eLibrary SPIN: 1776-4270; e-mail: vvo@rosmedex.ru

Victor A. Gombolevskiy, MD, Cand. Sci. (Med.);

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1816-1315>;
eLibrary SPIN: 6810-3279; e-mail: gombolevskii@gmail.com

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Таблица 10. Рекомендации по дополнительным методам обследования

Патология	Клинические рекомендации	Консультации / дообследования /наблюдения в динамике
Лёгочные узлы	Гомболевский В.А., Блохин И.А., Лайпан А.Ш., и др. Методические рекомендации по скринингу рака лёгкого. Серия «Лучшие практики лучевой и инструментальной диагностики». Вып. 56. Москва: ГБУЗ НПКЦ ДиТ ДЗМ, 2020. 57 с.	<i>Консультации:</i> онколог. <i>Дообследования:</i> биопсия, бронхоскопия под КТ/УЗИ контролем, цитология, анализ крови (ВИЧ, сифилис, гепатит), ФВД, спирометрия, ОАК, ЭКГ, ПЭТ/КТ, МРТ головного мозга с внутривенным контрастированием. <i>Наблюдения в динамике:</i> в зависимости от количества и размеров лёгочных узлов рекомендована КТ ОГК через 3–6 мес
Инфильтративные изменения в лёгких, характерные для вирусной пневмонии (COVID-19 в условиях пандемии)	Временные методические рекомендации. Профилактика, диагностика и лечение новой коронавирусной инфекции (COVID-19). Министерство здравоохранения Российской Федерации. Версия 17 (14.12.2022). Режим доступа: https://static-0.minzdrav.gov.ru/system/attachments/attaches/000/061/254/original/%D0%92%D0%9C%D0%A0_COVID-19_V17.pdf?1671088207	<i>Консультации:</i> терапевт. <i>Дообследования:</i> пульсоксиметрия; ЭКГ; выявление РНК SARS-CoV-2 с применением метода амплификации нуклеиновых кислот; выявление антигенов SARS-CoV-2 с применением иммунохроматографических методов; ОАК с определением уровня эритроцитов, гемоглобина, гематокрита, лейкоцитов, тромбоцитов, лейкоцитарной формулы; биохимический анализ крови (мочевина, креатинин, электролиты, глюкоза, АЛТ, АСТ, билирубин, альбумин, лактат, лактатдегидрогеназа; дополнительно могут быть исследованы тропонин как маркер повреждения миокарда и ферритин как белок острой фазы воспаления, дающий информацию о тяжести течения заболевания и прогнозе), СРБ; гормональное исследование (прокальцитонин, NT-proBNP); коагулограмма (в объёме активированное частичное тромбопластиновое время, протромбиновое время, протромбиновое отношение и/или % протромбина по Квику, фибриноген, D-димер количественным методом). <i>Наблюдения в динамике:</i> через 8 нед после выписки рекомендуется посещение врача и проведение инструментальных исследований (по показаниям): рентгенографии ОГК*, спирографии*, измерения насыщения крови кислородом (сатурация) в покое и при нагрузке (возможно проведение теста 6-минутной ходьбы с определением сатурации до и после теста)*, ЭхоКГ, других методов исследования (диффузионный тест, газы артериальной крови и др.) * При выявлении патологии — проведение КТ лёгких
Эмфизема лёгких	Эмфизема лёгких. Клинические рекомендации (утв. Министерством здравоохранения РФ, 2021). Режим доступа: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/402775957/	<i>Консультации:</i> пульмонолог/терапевт. <i>Дообследования:</i> анализ газов крови. Пациентам с подозрением на наследственный дефицит А1АТ рекомендуется определение активности А1АТ в крови, спирометрия с бронходилатационным тестом, бодиплетизмография и исследование диффузионной способности лёгких. Всем пациентам с клиническими признаками дефицита А1АТ и/или сниженной концентрации А1АТ в сыворотке крови рекомендуется определение фенотипа и генотипа. <i>Наблюдения в динамике:</i> всем пациентам с дефицитом А1АТ рекомендуется ежегодное биохимическое общетерапевтическое исследование крови с определением уровня альбумина в крови, уровня общего билирубина в крови, активности АСТ в крови, активности АЛТ в крови, активности ГГТ в крови, уровня тромбоцитов в крови. Пациентам с лёгочной формой дефицита А1АТ вначале рекомендуется проводить спирометрию каждые 6–12 мес для исключения быстрого прогрессирования заболевания, после чего частота исследований может быть снижена. Пациентам с дефицитом А1АТ рекомендуется ежегодно проводить УЗИ ОБП для исключения проявления болезни со стороны печени

Таблица 10. Продолжение

Патология	Клинические рекомендации	Консультации / дообследования /наблюдения в динамике
Свободная жидкость (выпот) в плевральных полостях	Маскелл Н., Бутланд Р. Рекомендации Британского торакального общества (BTS) по обследованию взрослых больных с односторонним плевральным выпотом // Пульмонология. 2006. № 2. С. 13–26. doi: 10.18093/0869-0189-2006-2-13-26	<i>Консультации:</i> пульмонолог. Если выявлен туберкулёз — консультация фтизиатра, если злокачественное поражение — консультация онколога. <i>Дообследования:</i> рассмотреть необходимость аспирации плевральной жидкости (ASAP — «как можно скорее»); цитологическое исследование; определение белка; ЛДГ, рН; окраска по Граму; посев и определение чувствительности; окраска на кислотоустойчивые палочки; посев на микобактерии туберкулёза. Далее, если необходимо, КТ ОГК с внутривенным контрастированием; биопсия плевры. Если причина после всех исследований не найдена — рассмотреть вопрос о торакокопии
Аневризма/ дилатация аорты	Клинические рекомендации. Рекомендации по диагностике и лечению заболеваний аорты (2017) // Кардиология и сердечно-сосудистая хирургия. 2018. № 1. С. 7–67	<i>Консультации:</i> кардиолог/сосудистый хирург. <i>Дообследования:</i> КТ-аортография с внутривенным контрастированием. <i>Наблюдения в динамике:</i> трансторакальная ЭхоКГ, УЗИ ОБП
Дилатация ствола лёгочной артерии	Клинические рекомендации. Лёгочная гипертензия, в том числе хроническая тромбоэмболическая лёгочная гипертензия, 2020 (03.06.2021). Утверждены Минздравом РФ. Режим доступа: http://disuria.ru/_ld/10/1026_kr20127MZ.pdf	<i>Консультации:</i> кардиолог. <i>Дообследования:</i> ЭхоКГ; ЭКГ; газы крови; сцинтиграфия лёгких перфузионная в сочетании со сцинтиграфией лёгких вентиляционной; ОАК с оценкой уровня гемоглобина и гематокрита, количества эритроцитов, лейкоцитов, тромбоцитов, СОЭ; биохимический анализ крови (исследование уровня креатинина, натрия, калия, глюкозы, общего белка, СРБ, АСТ, АЛТ, общего билирубина, мочевой кислоты); определение содержания антител к кардиолипину, фосфолипидам, бета-2-гликопротеину в крови при подозрении на хроническую тромбоэмболическую лёгочную гипертензию для выявления факторов риска; определение содержания антител к антигенам ядра клетки и ДНК для исключения ассоциации с системными заболеваниями соединительной ткани; исследование уровня NT-proBNP; определение антител классов М, G к ВИЧ-1 в крови, антител классов М, G к ВИЧ-2 в крови; определение антигена ВГВ, антител к ВГС, антител к бледной трепонеме; общий (клинический) анализ мочи; оценка функции щитовидной железы (исследование уровня свободного трийодтиронина, свободного тироксина и тиреотропного гормона); УЗИ ОБП (комплексное) для исключения патологии печени и/или портальной гипертензии
Коронарный кальциоз	Клинические рекомендации. Стабильная ишемическая болезнь сердца, 2020 (Одобрено Научно-практическим советом Минздрава РФ). Режим доступа: https://cg.minzdrav.gov.ru/schema/155_1	<i>Консультации:</i> кардиолог. <i>Дообследования:</i> ОАК (клинический) развёрнутый с измерением уровня гемоглобина, числа эритроцитов и лейкоцитов; исследование уровня креатинина в крови и оценка состояния функции почек по расчётной СКФ или клиренсу креатинина; биохимический анализ крови, включая исследование уровней общего холестерина крови, холестерина липопротеидов низкой плотности и триглицеридов; исследование уровня NT-proBNP в крови; ЭКГ в покое; амбулаторное мониторирование ЭКГ; ЭхоКГ; МРТ сердца может быть применено при получении неинформативных результатов при ЭхоКГ (в т.ч. с введением контраста); дуплексное сканирование экстракраниальных отделов сонных артерий для выявления атеросклеротических бляшек; КТ-коронарография; стресс-ЭКГ/стресс-ЭхоКГ/стресс-МРТ/ОФЭКТ. <i>Наблюдения в динамике:</i> при повторных исследованиях у всех пациентов с диагнозом стабильной ишемической болезни сердца рекомендуется проводить ежегодный контроль ОАК (клинического) развёрнутого, анализа крови биохимического общетерапевтического, анализа крови по оценке нарушений липидного обмена биохимического; исследование уровня креатинина в крови; исследование уровня глюкозы в крови натощак с целью своевременной коррекции терапии при необходимости

Таблица 10. Окончание

Патология	Клинические рекомендации	Консультации / дообследования /наблюдения в динамике
Оценка толщины надпочечников для поиска образований и гиперплазии	Клинические рекомендации. Рак коры надпочечника (Адренкортикальный рак), 2020 (Одобрено Научно-практическим советом Минздрава РФ). Режим доступа: https://cr.minzdrav.gov.ru/schema/341_1	<p><i>Консультации:</i> эндокринолог, онколог.</p> <p><i>Дообследования:</i> исследование гормональной активности опухоли надпочечника (кортизол, АКТГ, определение свободных метанефринов плазмы или фракционированных метанефринов суточной мочи; определение уровня альдостерона, ренина плазмы и калия сыворотки), КТ ОБП с внутривенным контрастированием (при наличии противопоказаний к выполнению КТ с контрастным усилением провести МРТ органов брюшной полости и забрюшинного пространства). При выявлении образования надпочечника с неопределённым КТ-фенотипом и отсутствии гормональной гиперсекреции рекомендовано рассмотреть ситуацию в консилиуме, при этом возможны три варианта решений: (1) проведение дополнительных визуализирующих исследований (ПЭТ/КТ с фтордезоксиглюкозой); (2) динамическое наблюдение с повторной КТ без контраста (или МРТ) через 3–6 мес; (3) хирургическое лечение.</p> <p><i>Наблюдения в динамике:</i> при образованиях с неопределённым КТ-фенотипом с целью динамической оценки размеров опухоли (если на основании первичной диагностики было выбрано наблюдение) рекомендована повторная КТ/МРТ через 3–6 мес. Хирургическое лечение показано при увеличении размеров образования на 20% (или увеличение максимального диаметра >5 мм) за короткий период наблюдения</p>
Оценка плотности губчатого вещества тел позвонков для выявления остеопороза/остеопении	Клинические рекомендации. Остеопороз, 2021 (Одобрено Научно-практическим советом Минздрава РФ). Режим доступа: https://cr.minzdrav.gov.ru/recomend/87_4	<p><i>Консультации:</i> эндокринолог.</p> <p><i>Дообследования:</i> ОАК (клинический); исследование уровня биохимических параметров крови (общего кальция, креатинина с подсчётом СКФ, неорганического фосфора, определение активности ЩФ, глюкозы); определение С-концевого телопептида в крови, и/или исследование уровня N-терминального пропептида проколлагена 1-го типа (P1NP) в крови (маркера резорбции при назначении антирезорбтивной терапии и костеобразования при назначении анаболической терапии соответственно) пациентам, получающим лечение остеопороза самостоятельно, исходно и через 3 мес от начала терапии с целью ранней оценки эффективности лечения и приверженности к терапии; проведение двухэнергетической рентгеноденситометрии (DXA) поясничного отдела позвоночника и проксимального отдела бедренной кости; трёхмерное измерение максимального потребления кислорода, производимое при количественной КТ (опционально)</p>
Компрессионные переломы позвонков для выявления остеопороза	Клинические рекомендации. Патологические переломы, осложняющие остеопороз, 2022 (Одобрено Научно-практическим советом Минздрава РФ). Режим доступа: https://cr.minzdrav.gov.ru/recomend/614_2	<p><i>Консультации:</i> эндокринолог.</p> <p><i>Дообследования:</i> ОАК (клинический); общий (клинический) анализ мочи; анализ крови биохимический общетерапевтический с исследованием кальция общего и/или ионизированного, неорганического фосфора, общей ЩФ, креатинина крови с подсчётом СКФ); исследование уровня паратиреоидного гормона в крови, кальция и фосфора суточной мочи; двухэнергетическая рентгеноденситометрия. При наличии низкоэнергетического перелома тела позвонка у лиц старше 50 лет требуется исследование крови и мочи на парапротеины и М-градиент для исключения миеломной болезни</p>

Примечание. КТ — компьютерная томография; УЗИ — ультразвуковое исследование; ВИЧ — вирус иммунодефицита человека; ФВД — функция внешнего дыхания; ОАК — общий анализ крови; ЭКГ — электрокардиограмма; ПЭТ/КТ — позитронно-эмиссионная томография, совмещённая с рентгеновской компьютерной томографией; МРТ — магнитно-резонансная томография; ОГК — органы грудной клетки; АЛТ — аланинаминотрансфераза; АСТ — аспартатаминотрансфераза; СРБ — С-реактивный белок; NT-proBNP — мозговой натрий-уретический пептид; ЭхоКГ — эхокардиография; А1АТ — альфа-1-антитрипсин; ГГТ — гамма-глутамилтрансфераза; ОБП — органы брюшной полости; ЛДГ — лактатдегидрогеназа; СОЭ — скорость оседания эритроцитов; ВГВ — вирус гепатита В; ВГС — вирус гепатита С; СКФ — скорость клубочковой фильтрации; ОФЭКТ — однофотонная эмиссионная компьютерная томография; АКТГ — адренкортикотропный гормон; ЩФ — щелочная фосфатаза.

Таблица 11. Стаж работы врачей

Врач	Стаж работы, лет			Объём ставки	Наличие учёной степени
	в рентгенологии (с учётом ординатуры)	в торакальной рентгенологии (без учёта ординатуры)	в КТ		
Врач № 1	15	13	13	Частичная	Да
Врач № 2	17	5	5	Частичная	Нет
Врач № 3	7	5	5	Полная	Нет
Врач № 4	16	14	14	Частичная	Нет
Врач № 5	7	5	5	Частичная	Нет
Врач № 6	5	3	3	Частичная	Да
Врач № 7	14	10	10	Частичная	Нет

Обобщённая линейная модель

Обобщённая линейная модель предполагает, что каждое наблюдение Y_j линейно зависит от значений переменных X_{jp} , $p=1,2,\dots,m$:

$$Y_j = b_{j0} + b_1 X_{j1} + b_2 X_{j2} + \dots + b_m X_{jm} + \varepsilon_j$$

где переменные X могут быть как категориальными, учитывающими группы, классы, категории, так и непрерывными. В обобщённой линейной модели оцениваются коэффициенты $\{b_j, j=0,1,2,\dots,m\}$ для модели зависимости параметра Y от факторов $\{X_j, j=1,2,\dots,m\}$. Для этих коэффициентов определяется их статистическая значимость (вычисление p -значений для проверки гипотез $H_{j0}: b_j=0, j=0,1,2,\dots,m$), которая показывает значимость влияния соответствующих факторов на целевой параметр.

В нашем случае некоторые параметры имеют логарифмическое нормальное распределение, поэтому к ним было применено логарифмическое преобразование. В итоге модель имеет вид:

$Y = \log(\text{Total number of protocols with critical and non-critical errors})$

$X_1 = \text{All protocols}$

$X_2 = \log(\text{Work experience in thoracic radiology (excluding residency)})$

$X_3 = \log(\text{Length of experience in CT})$

и категориальный параметр $X_4 = \text{Academic degree}$.

Результаты оценки коэффициентов обобщённой линейной модели и их статистическая значимость приведены в таблице:

Можно сделать вывод, что общее число протоколов статистически значимо увеличивает количество ошибок. Общий стаж работы в рентгенологии и торакальной рентгенологии уменьшает количество ошибок, однако эти данные не являются репрезентативными в силу малой выборки врачей и наличия доминантного случая.

Частично похожие результаты (с точностью до статистической значимости и влияния одного из видов опыта) отражаются и в корреляционном анализе:

- $\rho(\log(\text{Total number of protocols with critical and non-critical errors}), \text{All protocols}) = 0,88$ с 95% ДИ [0,39; 0,98] и p -значением 0,008 (корреляция статистически значима);
- $\rho(\log(\text{Total number of protocols with critical and non-critical errors}), \log(\text{Work experience in thoracic radiology (excluding residency)})) = -0,45$ с 95% ДИ [-0,9; 0,46] и p -значением 0,31 (корреляция статистически незначима);
- $\rho(\log(\text{Total number of protocols with critical and non-critical errors}), \log(\text{Work experience in thoracic radiology (excluding residency)})) = -0,27$ с 95% ДИ [-0,85; 0,61] и p -значением 0,56 (корреляция статистически незначима).

Однако при отсутствии статистической значимости корреляций говорить о каких-то тенденциях не представляется возможным.

	Estimate	Std..Error	t.value	Pr...t..
(Intercept)	0,132922	0,352989	0,37656	0,742697
bd_lr\$"All protocols"	0,037246	0,006111	6,094863	0,025879
log(bd_lr\$"Work experience in thoracic radiology/r/n(excluding residency)/r/n")	-7,96969	1,009013	-7,8985	0,015654
factor(bd_lr\$"Academic degree")нет	-0,92975	0,229399	-4,05297	0,055828

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD201870>

Создание набора данных с диспозицией и транспозицией наложения электрокардиографических электродов при записи электрокардиограммы в 12 отведениях

Т.М. Газашвили¹, Д.В. Дроздов², Д.В. Шутов³, А.С. Шкода¹¹ Городская клиническая больница № 67 имени Л.А. Ворохобова, Москва, Российская Федерация² Национальный медицинский исследовательский центр кардиологии имени академика Е.И. Чазова, Москва, Российская Федерация³ Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий, Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Электрокардиография — одна из наиболее простых, широко распространённых, недорогих и информативных методик в функциональной диагностике, однако её диагностическая ценность резко снижается при неправильном проведении. Предпринимались попытки систематизировать ошибки и отклонения при наложении электродов, но все они касались наиболее частых вариантов (перестановка электродов красного и жёлтого, жёлтого и зелёного, грудных — выше или ниже стандартной схемы).

Цель — создать набор данных электрокардиограмм с разными вариантами транспозиций и диспозиций электродов при регистрации электрокардиограммы для обучения и тестирования систем машинного обучения.

Материалы и методы. В исследование включены пациенты в возрасте от 18 до 75 лет, 27 мужчин и 22 женщины. Все пациенты давали добровольное информированное согласие на проведение регистрации электрокардиограммы. Кардиограмму регистрировали на приборе «Модульная система для регистрации и дистанционной передачи электрокардиограммы «EASY ECG»». Каждому пациенту во время одного визита последовательно регистрировали электрокардиограммы с корректным наложением электродов и различными вариантами дис- и транспозиций.

Результаты. Всего зарегистрировано 488 электрокардиограмм у 49 пациентов. Полученные результаты свидетельствуют о значительной вариативности картины электрокардиограммы. При визуальном анализе зарегистрированных электрокардиограмм определение транспозиции, связанной с перестановкой отведений на руках и в грудных электродах C1–C2, не вызывало затруднений. Реже надёжно определялась установка грудных электродов в контакте друг с другом, диспозиции с переносом грудных отведений выше или ниже на 2 межреберья по сравнению со схемой Wilson. Транспозиции жёлтого и зелёного конечностных электродов, изменение положения грудных электродов, когда их «выстраивают» по прямой линии, «задирают» по межреберью, путают местами C5–C6, затруднительно определять даже при сопоставлении рядом двух кардиограмм — с правильным и транспозиционным наложением электродов. Вероятно, это зависит как от исходных изменений на электрокардиограмме, так и от типа телосложения, размеров молочной железы или наличия имплантата.

Заключение. Получен набор данных электрокардиограмм с различными вариантами дислокаций электродов. Набор данных состоит из серий электрокардиограмм, зарегистрированных у каждого пациента с различными вариантами наложения электродов (в наборе представлены не только нормальные электрокардиограммы, но и различные варианты электрокардиографических отклонений).

Ключевые слова: электрокардиограмма; ЭКГ; дефекты регистрации электрокардиограммы; искусственный интеллект; алгоритмы; функциональная диагностика.

Как цитировать

Газашвили Т.М., Дроздов Д.В., Шутов Д.В., Шкода А.С. Создание набора данных с диспозицией и транспозицией наложения электрокардиографических электродов при записи электрокардиограммы в 12 отведениях // *Digital Diagnostics*. 2023. Т. 4, № 2. С. 133–141. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD201870>

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD201870>

Creation of a training and test dataset with the disposition and transposition of overlaying electrocardiographic electrodes when recording electrocardiograms-12

Tamara M. Gazashvili¹, Dmitry V. Drozdov², Dmitry V. Shutov³, Andrey S. Shkoda¹

¹ City Clinical Hospital No. 67 named after L.A. Vorokhobov, Moscow, Russian Federation

² National Medical Research Centre of Cardiology Named After Academician E.I. Chazov, Moscow, Russian Federation

³ Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: Electrocardiography is one of the simplest, most widely used, inexpensive, and informative methods in functional diagnostics; yet, if performed poorly, its diagnostic value is sharply reduced. Several attempts were made to systematize errors and deviations in electrode application, but all concerned the most common options (rearrangement of red and yellow electrodes, yellow and green electrodes, and chest electrodes — above or below the standard scheme).

AIM: To create an electrocardiogram dataset with different options for transpositions and dispositions of electrodes during electrocardiogram recording.

MATERIALS AND METHODS: The study included patients aged 18–75 years (27 males and 22 females). All patients provided informed consent for electrocardiogram registration. During one visit, the cardiogram was recorded on the device “Modular system for recording and remote transmission of electrocardiograms (EASY ECG)” for each patient.

RESULTS: In all, 488 electrocardiograms were recorded in 49 patients. The results obtained indicate a significant variability of the electrocardiogram pattern. Visual analysis of the electrocardiograms revealed no difficulties in determining the transposition associated with rearranging the leads on the arms (RY) in the thoracic C1–C2. The placement of thoracic electrodes in contact cheek-to-cheek dispositions with the transfer of thoracic leads above or below two intercostals was reliably determined compared with the Wilson scheme. The transpositions of the yellow and green limb electrodes and the change in the position of the thoracic ones when they are “lined up” in a straight line, “bullied” between the ribs (curved), and confused in places C5 and C6 are difficult to determine even when comparing two cardiograms next to each other, with the correct and transpositional superposition of the electrodes. The initial changes on the electrocardiograms, physique type, breast size, or the presence of an implant most likely determine it.

CONCLUSION: An electrocardiography dataset was obtained using various electrode dislocation variants. The dataset consists of a series of electrocardiograms obtained for each patient with several electrode placement options and contains both normal and pathological electrocardiograms.

Keywords: electrocardiogram; ECG; defects in the registration of the electrocardiogram; artificial intelligence; algorithms; functional diagnostics.

To cite this article

Gazashvili TM, Drozdov DV, Shutov DV, Shkoda AS. Creation of a training and test dataset with the disposition and transposition of overlaying electrocardiographic electrodes when recording electrocardiograms-12. *Digital Diagnostics*. 2023;4(2):133–141. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD201870>

Received: 04.04.2023

Accepted: 15.05.2023

Published: 15.06.2023

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD201870>

在记录12导联心电图时，创建一个具有心电图电极应用配置和转置的数据集

Tamara M. Gazashvili¹, Dmitry V. Drozdov², Dmitry V. Shutov³, Andrey S. Shkoda¹

¹ City Clinical Hospital No. 67 named after L.A. Vorokhobov, Moscow, Russian Federation

² National Medical Research Centre of Cardiology Named After Academician E.I. Chazov, Moscow, Russian Federation

³ Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies, Moscow, Russian Federation

简评

论证。心电图是功能诊断中最简单、最常见、最便宜和最有信息量的方法之一，然而它的诊断价值在错误操作中急剧下降。试图使电极应用时的错误和偏差系统化，但这些错误和偏差都涉及到最常见的变体（把红色和黄色、黄色和绿色、胸腔的电极移动到高于或低于标准方案的位置）。

该研究的目的是在记录心电图时创建一个具有不同电极配置和转置的心电图数据集，以训练和测试机器学习系统。

材料和方法。年龄在18至75岁的患者被纳入本研究，其中男性27人，女性22人。所有患者都自愿知情同意记录心电图。心电图是在《记录和远程传输心电图的模块化系统“EASY ECG”》设备上记录的。每位患者在一次就诊中都依次接受心电图检查，其中有正确的电极应用及不同的配置和转置的变体。

结果。一共有49名患者，记录了488张心电图。研究结果表明，心电图模式有很大的变异性。在对记录的心电图进行目测分析时，发现与手臂和胸腔C1-C2电极移动有关的转置并不困难。很少有胸腔电极相互接触的情况，与Wilson方案相比，胸腔导联移高或移低2个肋间的配置被可靠地发现。黄色和绿色肢体电极的转置，当“排成”一条直线，沿肋间隙“乱”，以及混入C5-C6时，胸廓电极的改变，即使并排比较两张心电图，有正确和转置的电极应用，也很难确定。这可能既取决于基线心电图的变化，也取决于体型、乳房大小或是否有植入物。

结论。我们获得了一个具有不同电极脱位变体的心电图数据集。该数据集由一系列记录在每个病人身上的不同电极应用变体的心电图组成（数据集中不仅有正常的心电图，还有不同的心电图异常变体）。

关键词：心电图；ECG；心电图记录失误；人工智能；算法；功能诊断。

To cite this article

Gazashvili TM, Drozdov DV, Shutov DV, Shkoda AS. 在记录12导联心电图时，创建一个具有心电图电极应用配置和转置的数据集. *Digital Diagnostics*. 2023;4(2):133-141. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD201870>

收到: 04.04.2023

接受: 15.05.2023

发布日期: 15.06.2023

ОБОСНОВАНИЕ

Электрокардиография (ЭКГ) — одна из наиболее простых, широко распространённых, недорогих и информативных методик в кардиологии, однако её диагностическая ценность резко снижается при неправильном проведении. Наиболее распространённым изменением методики регистрации является смещение (дислокация) электродов. Следует различать диспозицию (сознательное и необходимое изменение расположения электродов) и транспозицию (ошибочное изменение расположения электродов в сравнении со стандартной схемой наложения).

Предпринималось несколько попыток систематизировать ошибки и отклонения при наложении электродов, но все они касались наиболее частых вариантов (перестановка электродов красного и жёлтого, жёлтого и зелёного, грудных — выше или ниже стандартной схемы) [1–7]. Для того чтобы избежать ошибок интерпретации записи ЭКГ, разрабатываются алгоритмы, способные выявить ошибки такого рода. Машинные алгоритмы стабильно распознают транспозицию RL (Right–Left — справа налево).

Для оценки качества и определения критериев возможности применения таких алгоритмов необходимо создать наборы данных ЭКГ для обучения и тестирования как алгоритмов автоматического анализа ЭКГ, так и медицинских специалистов — врачей и среднего персонала.

Цель исследования — создать набор данных ЭКГ с разными вариантами транспозиций и диспозиций электродов при регистрации ЭКГ для обучения и тестирования систем машинного обучения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Критерии включения

В исследование включены пациенты в возрасте от 18 до 75 лет, 27 мужчин и 22 женщины. Все пациенты давали добровольное информированное согласие на проведение регистрации ЭКГ.

Условия проведения

Работа проведена на базе ГБУЗ города Москвы «Городская клиническая больница № 67 имени Л.А. Ворохова» Департамента здравоохранения города Москвы.

Описание медицинского вмешательства

Пациенты были разделены на 6 групп:

- 1) пациенты с ЭКГ, являющейся вариантом нормы (записи, начинающиеся на 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110);

- 2) пациенты с ЭКГ-признаками гипертрофии левого желудочка или полной блокады левой ножки пучка Гиса (записи, начинающиеся на 201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 209);
- 3) пациенты с ЭКГ-признаками блокады правой ножки пучка Гиса (записи, начинающиеся на 301, 302, 303, 304, 305, 306);
- 4) пациенты с зарегистрированной депрессией сегмента ST(–) (записи, начинающиеся на 401, 402, 403, 404, 405, 406, 407, 408, 409);
- 5) пациенты с зарегистрированной элевацией сегмента ST(+), в том числе с феноменом ранней реполяризации желудочков (записи, начинающиеся на 501, 502, 503, 504, 505, 506, 507);
- 6) пациенты с любым несинусовым ритмом, предпочтительно характеризующимся отрицательными *P* в I, II, V1, V2 отведениях (записи, начинающиеся на 601, 602, 603, 604, 605, 606, 607, 608).

Кардиограмму регистрировали с использованием прибора «Модульная система для регистрации и дистанционной передачи ЭКГ «EASY ECG» по ТУ 9441-001-42447560-2012 с принадлежностями» (ООО «АТЕС МЕДИКА СОФТ», Россия; Регистрационное удостоверение № РЗН 2018/7062).

Для регистрации ЭКГ использовали исправные серебряно-хлоридсеребряные электроды с размером пластин 26×47 мм для накладываемых на конечности и диаметром чашечки 22 мм для грудных.

Оцифрованные кардиосигналы записывали в формате edf+ (European Data Format) [8]. Запись велась в 12 общепринятых отведениях с частотой дискретизации 500 Гц, продолжительность записи — 10 секунд, размах сигнала — 10 мВ. Фильтрация сигнала не проводилась, полоса пропускания — от 0,05 до 150 Гц.

Этическая экспертиза

На проведение исследования получено одобрение независимого этического комитета Московского регионального отделения Российского общества рентгенологов и радиологов (НЭК МРО РОПР).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Каждому пациенту во время одного визита последовательно регистрировали ЭКГ с корректным наложением электродов и различными вариантами дис- и транспозиций. Кодировка и описание схем наложения приведены в табл. 1.

Всего было зарегистрировано 486 ЭКГ у 49 пациентов. Структура зарегистрированных ЭКГ приведена в табл. 2.

После регистрации все результаты были обезличены и псевдонимизированы¹, размещены

¹ ГОСТ Р 55036-2012/ISO/TS 25237:2008. Группа П85. Национальный стандарт Российской Федерации. Информатизация здоровья. Псевдонимизация. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200100339>.

Таблица. 1. Варианты расположения электродов и их кодировка

Формулировка на русском	Английский эквивалент	Часть имени файла ЭКГ	Комментарий	Некорректно отображаемые отведения
Стандартное расположение электродов	Standard electrodes' arrangement	dis_st	Правильно и корректно наложенные электроды	Все отведения корректные и правильные
Грудные электроды: на 2 межреберья выше стандартной схемы	Precordial electrodes' misplacement: up to 2 intercostal spaces above the standard arrangement	dis_u2	Иногда требуются по клиническим показаниям, но в основном это самое частое нарушение наложения электродов	Правильно: I, II, III, aVR, aVL, aVF. Смещены: V1, V2, V3, V4, V5, V6
Грудные электроды: на 2 межреберья ниже стандартной схемы	Precordial electrodes' misplacement: below to 2 intercostal spaces down the standard arrangement	dis_d2	Иногда требуются по клиническим показаниям, но в основном это нарушение наложения электродов	Правильно: I, II, III, aVR, aVL, aVF. Смещены V1, V2, V3, V4, V5, V6
Перепутаны красный (R) и жёлтый (L) электроды	Reversal of the two arm electrodes	trns_ry	Ошибка наложения	Неправильно: I, II, III, aVR, aVL, aVF. Правильно: V1, V2, V3, V4, V5, V6
Перепутаны жёлтый (L) и зелёный (F) электроды	Reversal of the left arm and left leg electrodes	trns_yg	Ошибка наложения	Неправильно: I, II, III, aVR, aVL, aVF. Правильно: V1, V2, V3, V4, V5, V6
Все грудные электроды расположены на прямой линии от C1–C6	All chest electrodes are placed at the same line	trns_ln	Ошибка наложения	Правильно: I, II, III, aVR, aVL, aVF, V1. Неправильно: V2, V3, V4, V5, V6
Перепутаны C1–C2	Reversal of the C1 and C2 electrodes	trns_12c	Ошибка наложения	Правильно: I, II, III, aVR, aVL, aVF, V3, V4, V5, V6. Неправильно: V1, V2
Перепутаны C5–C6	Reversal of the C5 and C6 electrodes	trns_56c	Ошибка наложения	Правильно: I, II, III, aVR, aVL, aVF, V1, V2, V3, V4. Неправильно: V5, V6
Электроды C4, C5, C6 расположены очень близко друг к другу (соприкасаются)	The C4, C5, C6 electrodes are placed too close to each other (cheek to cheek)	trns_cls	Ошибка наложения	Правильно: I, II, III, aVR, aVL, aVF, V1, V2, V3. Неправильно: V4, V5, V6
Электроды C4, C5, C6 расположены по межреберью (не по горизонтальной линии, а искривляются вверх)	The C4, C5, C6 electrodes are misplaced along the intercostal space (not at a horizontal line, but curved upwards)	trns_crv	Ошибка наложения	Правильно: I, II, III, aVR, aVL, aVF, V1, V2, V3. Неправильно: V4, V5, V6

и проаннотированы на платформе ECG.RU с использованием унифицированного тезауруса [9]. Каждый файл ЭКГ был наименован по следующим принципам: первые три цифры — номер подгруппы пациента и порядковый номер, последующие буквы — кодировка расположения электродов.

Так, например, название файла «101_dis_st» означало, что это ЭКГ зарегистрирована у пациента с неизменной ЭКГ, электроды наложены корректно. Имя файла

«203_trns_crv» содержит ЭКГ пациента с гипертрофией левого желудочка, электроды C4, C5, C6 расположены по межреберью (не по горизонтальной линии, а искривляются вверх). Имя файла «602_trns_yg» содержит ЭКГ пациента с несинусовым ритмом, перепутаны жёлтый и зелёный электроды.

Примеры зарегистрированных ЭКГ приведены в парных рисунках 1–3 (схема наложения и соответствующая им ЭКГ).

Таблица 2. Распределение кардиограмм, зарегистрированных у пациентов

Подгруппа ЭКГ-изменений	Тип расположения	Стандартное расположение электродов	Дислокация грудных электродов	Транспозиция электродов от конечностей	Транспозиция грудных электродов	Итого
Нормальная ЭКГ		10	20	20	49	99
ЭКГ с ГЛЖ или ПБЛНПГ		9	18	18	45	90
ЭКГ с БПНПГ		6	12	12	30	60
ЭКГ с депрессией сегмента ST(-)		9	18	18	43	88
ЭКГ с элевацией сегмента ST(+)		7	14	14	35	70
ЭКГ с любым несинусовым ритмом		8	15	16	40	79
Итого		49	97	98	242	486

Примечание. ЭКГ — электрокардиограмма; ГЛЖ — гипертрофия левого желудочка; ПБЛНПГ — полная блокада левой ножки пучка Гиса; БПНПГ — блокада правой ножки пучка Гиса.

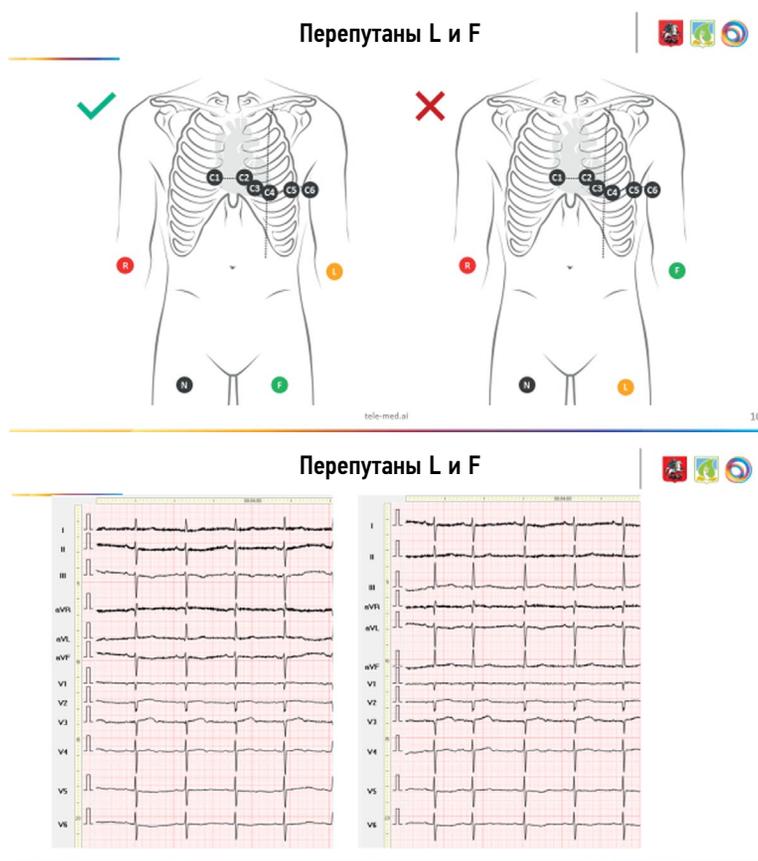


Рис. 1. Нарушение наложения электродов L и F.

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты свидетельствуют о значительной вариативности картины ЭКГ в зависимости от исходных изменений и, вероятно, типа телосложения пациента и состояния молочных желёз. И если вариативность изменений нормальной ЭКГ изучена достаточно [6–8], то вариативность изменений при исходно «ненормальной» ЭКГ ещё предстоит изучить, что мы и предпримем в следующей работе.

При визуальном анализе зарегистрированных ЭКГ определение транспозиции, связанной с перестановкой отведений на руках (красного и жёлтого — RL) и в грудных C1–C2, не вызывало затруднений. Реже надёжно определялась установка грудных электродов в контакте друг с другом (cheek-to-cheek), в диспозиции с переносом грудных отведений выше или ниже на два межреберья по сравнению со схемой Wilson (upper2, down2). Транспозиции жёлтого и зелёного конечностных электродов

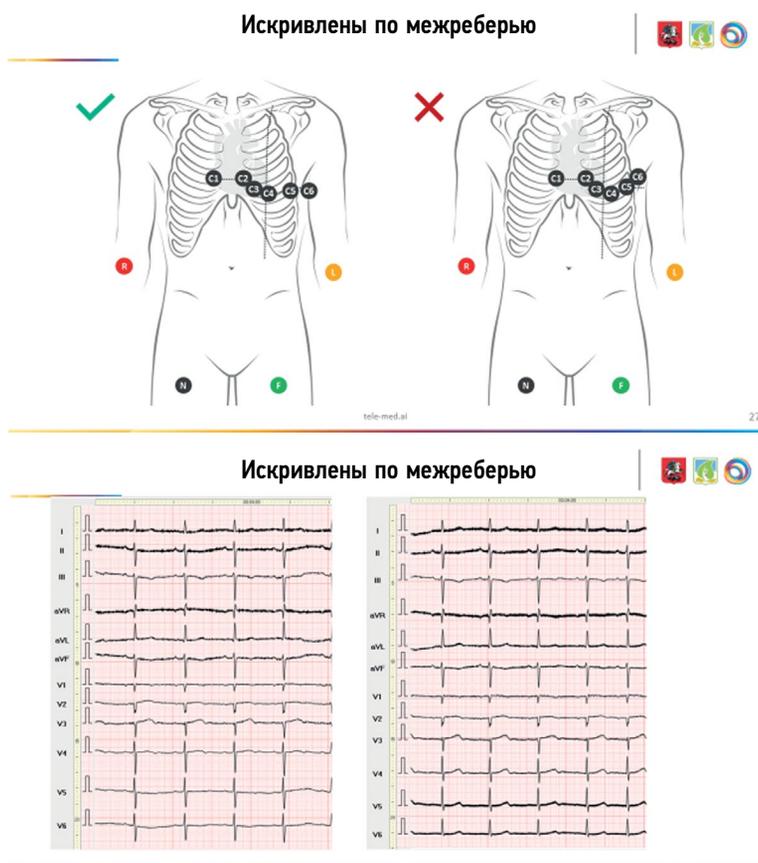


Рис. 2. Нарушение наложения электродов C4–C6.

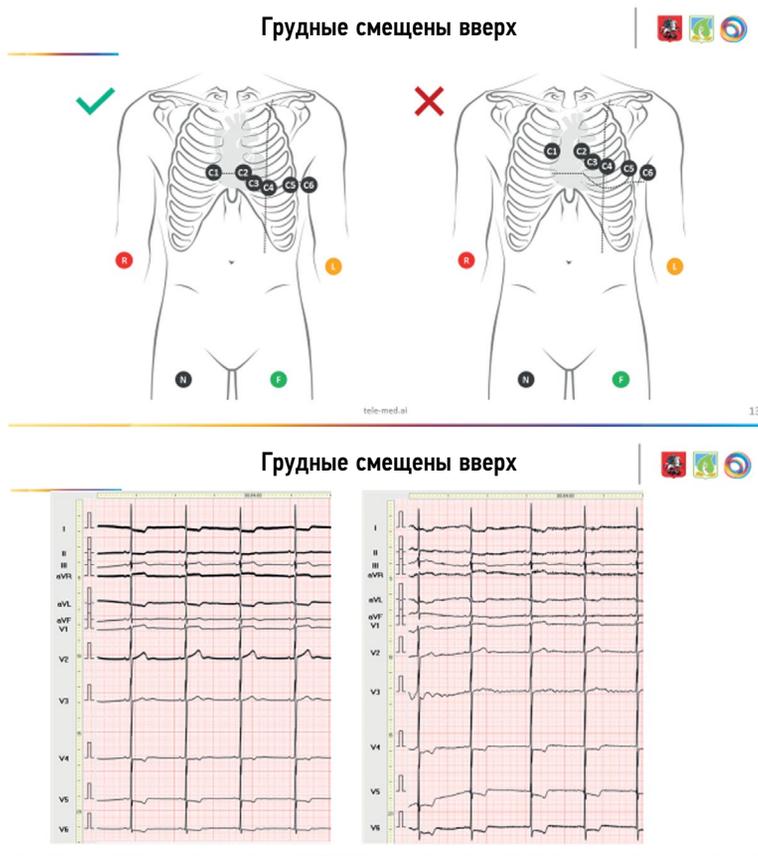


Рис. 3. Смещение электродов C4–C6.

(LF), изменение положения грудных электродов, когда их «выстраивают» по прямой линии (line), «задирают» по межреберью (curved) или путают местами C5–C6, затруднительно определять даже при сопоставлении рядом двух кардиограмм — с правильным и транспозиционным наложением электродов. Вероятно, это зависит как от исходных изменений на ЭКГ, так и от типа телосложения (нормо-, гипер-, астеник), размеров молочной железы или наличия имплантата. Безусловно, такие вопросы, как учёт типа телосложения, наличия трансплантата, возможная детализация исходных изменений ЭКГ в соответствии с редуцированным тезаурусом, а также сравнение эффективности распознавания специалистом и алгоритмами автоматического анализа, требуют дальнейшего изучения.

Несмотря на известные нам недостатки, учитывая высокую значимость проблемы и трудоёмкость получения качественно зарегистрированных данных и проаннотированных ЭКГ, было решено опубликовать полученный набор ЭКГ под открытой лицензией и использовать его как для верификации алгоритмов автоматического анализа ЭКГ, так и для обучения врачей и среднего медицинского персонала.

Ограничения исследования

При обследовании пациентов не всегда учитывались их рост, вес и конституция (соматотипы). Учёт этих факторов, вероятно, позволит увеличить точность определения типа дислокации электродов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получен набор данных ЭКГ с различными вариантами дислокаций электродов. Набор данных состоит из серий ЭКГ, зарегистрированных у каждого пациента с различными вариантами наложения электродов. В наборе представлены не только нормальные ЭКГ, но и различные варианты ЭКГ-отклонений.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении поисково-аналитической работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rosen A.V., Koppikar S., Shaw C., Baranchuk A. Common ECG lead placement errors. Part I: Limb lead reversals // *Int J Med Students*. 2014. Vol. 2, N 3. P. 92–98. doi: 10.5195/ijms.2014.95
2. Rosen A.V., Koppikar S., Shaw C., Baranchuk A. Common ECG lead placement errors. Part II: precordial misplacements // *Int J Med Students*. 2014. Vol. 2, N 3. P. 99–103. doi: 10.5195/ijms.2014.96
3. Jekova I., Krasteva V., Leberet R., et al. Inter-lead correlation analysis for automated detection of cable reversals in 12/16-lead

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: Д.В. Дроздов — разработка концепции, организация процесса аннотирования, разработка тезауруса, авторский надзор; Т.М. Газашвили — организация регистрации ЭКГ, обезличивание и передача записей; Д.В. Шутов — разработка концепции, организация процессов обезличивания, передачи, аннотирования, авторский надзор; А.С. Шкода — общее руководство, организация работы центра инструментальной диагностики.

Благодарности. Авторы выражают благодарность ООО «Медицинские Компьютерные Системы», лично директору компании Прилуцкому Дмитрию Анатольевичу и всем сотрудникам платформы ECG.ru. Мещериной Татьяне Евгеньевне и Шалмановой Елене Геннадьевне медицинским сестрам Городской клинической больницы № 67 имени Л.А. Ворохобова за высококвалифицированную регистрацию ЭКГ.

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. D.V. Drozdov — concept development, organization of annotation process, thesaurus development, author supervision; T.M. Gazashvili — organization of ECG registration, depersonalization and transfer of records; D.V. Shutov — concept development, organization of depersonalization, transfer, annotation, author supervision; A.S. Skoda — general management, organization of the work of the center for instrumental diagnostics.

Acknowledgments. The authors express their gratitude to Medical Computer Systems LLC, personally to the director of the company Prilutsky Dmitry Anatolyevich and all employees of the platform ECG.ru. Meshcherina Tatiana Evgenievna and Shalmonova Elena Gennadievna for highly qualified ECG registration.

ECG // *Comput Methods Programs Biomed*. 2016. N 134. P. 31–41. doi: 10.1016/j.cmpb.2016.06.003

4. Kania M., Rix H., Fereniec M., et al. The effect of precordial lead displacement on ECG morphology // *Med Biological Engineering Computing*. 2014. Vol. 52, N 2. P. 109–119. doi: 10.1007/s11517-013-1115-9

5. Wenger W., Kligfield P. Variability of precordial electrode placement during routine electrocardiography // *J Electrocardiol*.

1996. Vol. 29, N 3. P. 179–184. doi: 10.1016/s0022-0736(96)80080-x

6. García-Niebla J., Llonop-García P., Valle-Racero J.I., et al. Technical mistakes during the acquisition of the electrocardiogram // *Ann Noninvasive Electrocardiol.* 2009. Vol. 14, N 4. P. 389–403. doi: 10.1111/j.1542-474X.2009.00328.x

7. Peberdy M.A., Ornato J.P. Recognition of electrocardiographic lead misplacements // *Am J Emergency Med.* 1993. Vol. 11, N 4. P. 403–405. doi: 10.1016/0735-6757(93)90177-d

8. Kemp B., Olivan J. European data format 'plus' (EDF+), an EDF alike standard format for the exchange of physiological data // *Clin Neurophysiol.* 2003. Vol. 114, N 9. P. 1755–1761. doi: 10.1016/s1388-2457(03)00123-8

9. Дроздов Д.В., Шутов Д.В., Газашвили Т.М., и др. Согласование врачебных описаний ЭКГ с применением тезауруса (списка типовых фраз) заключений // *Медицинский алфавит.* 2022. № 10. С. 19–26. doi: 10.33667/2078-5631-2022-11-19-26

REFERENCES

1. Rosen AV, Koppikar S, Shaw C, Baranchuk A. Common ECG lead placement errors. Part I: Limb lead reversals. *Int J Med Students.* 2014;2(3):92–98. doi: 10.5195/ijms.2014.95

2. Rosen AV, Koppikar S, Shaw C, Baranchuk A. Common ECG lead placement errors. Part II: precordial misplacements. *Int J Med Students.* 2014;2(3):99–103. doi: 10.5195/ijms.2014.96

3. Jekova I, Krasteva V, Leberet R, et al. Inter-lead correlation analysis for automated detection of cable reversals in 12/16-lead ECG. *Comput Methods Programs Biomed.* 2016;(134):31–41. doi: 10.1016/j.cmpb.2016.06.003

4. Kania M, Rix H, Fereniec M, et al. The effect of precordial lead displacement on ECG morphology. *Med Biological Engineering Computing.* 2014;52(2):109–119. doi: 10.1007/s11517-013-1115-9.

5. Wenger W, Kligfield P. Variability of precordial electrode placement during routine electrocardiography. *J Electrocardiol.* 1996;29(3):179–184. doi: 10.1016/s0022-0736(96)80080-x

6. García-Niebla J, Llonop-García P, Valle-Racero JI, et al. Technical mistakes during the acquisition of the electrocardiogram. *Ann Noninvasive Electrocardiol.* 2009;14(4):389–403. doi: 10.1111/j.1542-474X.2009.00328.x

7. Peberdy MA, Ornato JP. Recognition of electrocardiographic lead misplacements. *Am J Emergency Med.* 1993;11(4):403–405. doi: 10.1016/0735-6757(93)90177-d

8. Kemp B, Olivan J. European data format 'plus' (EDF+), an EDF alike standard format for the exchange of physiological data. *Clin Neurophysiol.* 2003;114(9):1755–1761. doi: 10.1016/s1388-2457(03)00123-8

9. Drozdov DV, Shutov DV, Gazashvili TM, et al. Coordination of medical ECG descriptions using a thesaurus (list of standard phrases) of conclusions. *Medical Alphabet.* 2022;(10):19–26. (In Russ). doi: 10.33667/2078-5631-2022-11-19-26

ОБ АВТОРАХ

* **Шутов Дмитрий Валерьевич**, д-р мед. наук;
адрес: Россия, 127051, Москва, ул. Петровка, д. 24, стр. 1;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1836-3689>;
eLibrary SPIN: 9381-2456; e-mail: ShutovDV@zdrav.mos.ru

Дроздов Дмитрий Владимирович, канд. мед. наук;
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7374-3604>;
eLibrary SPIN: 2279-9657; e-mail: cardioexp@gmail.com

Газашвили Тамара Михайловна;
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5875-9699>;
eLibrary SPIN: 4208-2303; e-mail: Tamaradoc24@gmail.com

Шкода Андрей Сергеевич, д-р мед. наук;
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9783-1796>;
eLibrary SPIN: 4520-2141; e-mail: a.shkoda@67gkb.ru

AUTHORS' INFO

* **Dmitry V. Shutov**, MD, Dr. Sci. (Med);
address: 24/1 Petrovka street, 127051 Moscow, Russia;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1836-3689>;
eLibrary SPIN: 9381-2456; e-mail: ShutovDV@zdrav.mos.ru

Dmitry V. Drozdov, MD, Cand. Sci. (Med);
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7374-3604>;
eLibrary SPIN: 2279-9657; e-mail: cardioexp@gmail.com

Tamara M. Gazashvili;
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5875-9699>;
eLibrary SPIN: 4208-2303; e-mail: Tamaradoc24@gmail.com

Andrey S. Shkoda, MD, Dr. Sci. (Med);
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9783-1796>;
eLibrary SPIN: 4520-2141; e-mail: a.shkoda@67gkb.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD375327>

Проблемы облучения персонала в современных медицинских технологиях

С.А. Рыжкин^{1, 7}, Ю.В. Дружинина^{1, 2}, З.А. Лантух², И.В. Солдатов², В.Н. Лесняк³,
Д.П. Лебедев³, Д.Н. Самочатов⁴, М.П. Семенова⁵, В.А. Сухов⁶, С.Е. Охрименко¹

¹ Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования, Москва, Российская Федерация

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

³ Федеральный научно-клинический центр специализированных видов медицинской помощи и медицинских технологий, Москва, Российская Федерация

⁴ Городская клиническая больница № 67 имени Л.А. Ворохобова, Москва, Российская Федерация

⁵ Государственный научный центр Российской Федерации — Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна, Москва, Российская Федерация

⁶ Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова (Сеченовский Университет), Москва, Российская Федерация

⁷ Казанский государственный медицинский университет, Казань, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Широкое применение источников ионизирующего излучения в медицинской практике (кардиоэндоваскулярной хирургии, эндоскопии, травматологии, урологии, нейрохирургии, стоматологии, отделениях радиоизотопной диагностики) приводит к облучению хрусталика глаза и кожи рук рассеянным излучением низкой интенсивности. Введение МАГАТЭ новых рекомендаций по снижению предела годовой эквивалентной дозы на хрусталик (20 мЗв) привело к тому, что оценка дозы по хрусталику на основе эффективной дозы стала некорректной.

Цель — анализ подходов и оценка эквивалентных доз облучения хрусталика глаза и кожи рук медицинского персонала при проведении различных диагностических исследований под воздействием рентгеновского излучения и гамма-излучения радиофармпрепарата, а также сравнение полученных результатов с ранее опубликованными данными.

Материалы и методы. Применялся метод термолюминесцентной дозиметрии. Оценка доз проводилась у персонала кардиоэндоваскулярной хирургии, эндоскопии, изотопной диагностики, стоматологии, урологии.

Результаты. Расчётные годовые эквивалентные дозы на хрусталик глаза у врачей отделений кардиоэндоваскулярной хирургии находились в диапазоне от 35 до 90 мЗв, среднего медицинского персонала — от 6 до 19 мЗв (в отдельных случаях у врача — до 225 мЗв, у медицинской сестры — до 180 мЗв); персонала отделения радиоизотопной диагностики — от 4,5 до 9 мЗв. Годовые расчётные эквивалентные дозы на кожу рук у персонала кардиоэндоваскулярной хирургии составили от 17 до 100 мЗв, а при работе с радиофармпрепаратами — от 24 до 220 мЗв. Показано, что использование оценки усреднённой дозы за одну операцию у врачей кардиоэндоваскулярной хирургии, как правило, неизбежно приводит к превышению эквивалентной дозы на хрусталик глаза через определённое количество операций.

Заключение. При превышении определённого количества операций (от 100 до 200) у врачей кардиоэндоваскулярной хирургии могут формироваться эквивалентные дозы на хрусталик глаза более 20 мЗв в год. Установлено поражение хрусталика глаза при существующих уровнях облучения у врача кардиоэндоваскулярной хирургии. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости дальнейших дозиметрических измерений и эпидемиологических исследований, на основании которых могут быть разработаны рекомендации по радиационной защите хрусталика глаза и кожи рук медицинского персонала, осуществляющего работу в поле рассеянного, гамма- и рентгеновского излучения низкой интенсивности.

Ключевые слова: источники ионизирующего излучения; персонал; кардиоэндоваскулярная хирургия; отделение радиоизотопной диагностики; хрусталик глаза; кожа рук; рассеянное излучение низкой интенсивности; годовая эквивалентная доза; термолюминесцентная дозиметрия; профессиональное поведение.

Как цитировать

Рыжкин С.А., Дружинина Ю.В., Лантух З.А., Солдатов И.В., Лесняк В.Н., Лебедев Д.П., Самочатов Д.Н., Семенова М.П., Сухов В.А., Охрименко С.Е. Проблемы облучения персонала в современных медицинских технологиях // *Digital Diagnostics*. 2023. Т. 4, № 2. С. 142–155. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD375327>

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD375327>

Problems of personnel irradiation in modern medical technologies

Sergey A. Ryzhkin^{1, 7}, Yuliya V. Druzhinina^{1, 2}, Zoya A. Lantuh², Ilya V. Soldatov², Viktor N. Lesnyak³, Dmitriy P. Lebedev³, Denis N. Samochatov⁴, Maria P. Semenova⁵, Vitaly A. Sukhov⁶, Sergey E. Okhrimenko¹

¹ Russian Medical Academy of Continuous Professional Education, Moscow, Russian Federation

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

³ Federal Research and Clinical Center of Specialized Medical Care and Medical Technologies, Moscow, Russian Federation

⁴ City Clinical Hospital No. 67 named after L.A. Vorokhobov, Moscow, Russian Federation

⁵ State Research Center — Burnasyan Federal Medical Biophysical Center, Moscow, Russian Federation

⁶ The First Sechenov Moscow State Medical University (Sechenov University), Moscow, Russian Federation

⁷ Kazan State Medical University, Kazan, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: The widespread use of radiation sources in medical practice (cardio-endovascular surgery, endoscopy, traumatology, urology, neurosurgery, dentistry, and radioisotope diagnostics departments) leads to irradiation of the lens of the eye and the skin of the hands. The introduction of new recommendations by the IAEA to reduce the limit of the annual equivalent dose to the lens (20 mSv) has led to an inaccurate dose assessment based on the effective dose.

AIM: To analyze approaches and assess equivalent doses of irradiation of the lens of the eye and skin of the hands of medical personnel during various diagnostic studies under the influence of X-rays and radiopharmaceuticals studies and to compare the results obtained with previously published data.

MATERIALS AND METHODS: Thermo-luminescent dosimetry was used. Dose assessment was performed by cardio-endovascular surgery, endoscopy, isotope diagnostics, dentistry, and urology personnel.

RESULTS: The estimated annual equivalent doses to the lens of the eye for doctors of cardio-endovascular surgery departments, in most cases, ranging 35–90 mSv, 6–19 mSv for the average medical staff (in some cases, the doctor [≤ 225 mSv] and the nurse [≤ 180 mSv]) and 4.5–9 mSv for the staff of the department of radioisotope diagnostics. The annual calculated equivalent doses to the skin of the hands for cardio-endovascular surgery personnel were 17–100 and 24–220 mSv for the staff working with radiopharmaceuticals. It is shown that the use of an estimate of the average dose per operation by cardio-endovascular surgery doctors, as a rule, inevitably leads to an excess of the equivalent dose to the lens of the eye after a certain number of operations.

CONCLUSION: When a certain number of operations are exceeded (100–200), equivalent doses to the eye's lens in cardio-endovascular surgery doctors above 20 mSv per year can be formed. At current radiation levels, a lesion of the eye's lens was found in a cardio-endovascular surgery doctor. The results indicate the need for further dosimetric measurements and epidemiological studies, based on which recommendations for radiation protection of the eye's lens and the skin of the hands of medical personnel working in low-intensity, scattered, gamma X-ray radiation can be developed.

Keywords: annual equivalent dose; cardio-endovascular surgery; eye lens; hand skin; low-intensity scattered radiation; professional behavior; radiation sources; radioisotope diagnostics department; staff; thermo-luminescent dosimetry.

To cite this article

Ryzhkin SA, Druzhinina YuV, Lantuh ZA, Soldatov IV, Lesnyak VN, Lebedev DP, Samochatov DN, Semenova MP, Sukhov VA, Okhrimenko SE. Problems of personnel irradiation in modern medical technologies. *Digital Diagnostics*. 2023;4(2):142–155. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD375327>

Received: 03.05.2023

Accepted: 25.05.2023

Published: 15.06.2023

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD375327>

使用现代医疗技术时医务人员受到辐射的问题

Sergey A. Ryzhkin^{1,7}, Yuliya V. Druzhinina^{1,2}, Zoya A. Lantuh², Ilya V. Soldatov², Viktor N. Lesnyak³, Dmitriy P. Lebedev³, Denis N. Samochatov⁴, Maria P. Semenova⁵, Vitaly A. Sukhov⁶, Sergey E. Okhrimenko¹

¹ Russian Medical Academy of Continuous Professional Education, Moscow, Russian Federation

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

³ Federal Research and Clinical Center of Specialized Medical Care and Medical Technologies, Moscow, Russian Federation

⁴ City Clinical Hospital No. 67 named after L.A. Vorokhobov, Moscow, Russian Federation

⁵ State Research Center — Burnasyan Federal Medical Biophysical Center, Moscow, Russian Federation

⁶ The First Sechenov Moscow State Medical University (Sechenov University), Moscow, Russian Federation

⁷ Kazan State Medical University, Kazan, Russian Federation

简评

论证。电离辐射源在医疗实践（心血管内外科、内窥镜检查、创伤科、泌尿科、神经外科、牙科、放射性同位素诊断部门）中的广泛使用导致眼球晶状体和手部皮肤受到低强度散射辐射。国际原子能机构引入的关于减少晶状体的年度等效剂量限制（20毫西弗）的新建议导致基于有效剂量的晶状体剂量评估是不正确的。

该研究的目的是分析方法和评估医务人员在X射线辐射和放射性药物的伽马射线影响下进行各种诊断检查时眼球晶状体和手部皮肤的等效辐射剂量，并对所得结果与以前公布的数据进行比较。

材料和方法。采用了热释光剂量测定法。评估了心血管内外科、内窥镜、同位素诊断、牙科和泌尿科人员的剂量。

结果。心血管外科医生眼球晶状体的计算年度等效剂量为35至90毫西弗，护理人员的为6至19毫西弗（在某些情况下，医生的高达225毫西弗，护士的高达180毫西弗），放射性同位素诊断部门人员的为4.5至9毫西弗。心血管内外科人员手部皮肤的计算年度等效剂量为17至100毫西弗，而在使用放射性药物的工作中，则为24至220毫西弗。事实证明，使用心脑血管外科医生每次手术时的平均剂量估算，通常不可避免地会在一定数量的手术后导致晶状体的超标等效剂量。

结论。超过一定数量的手术（100至200），心血管内外科医生每年接受的眼球晶状体的等效剂量可能超过20毫西弗。在现有辐射水平下，心血管内外科医生眼球晶状体的病变已经是确定的。所得结果证明，有必要进行进一步的剂量测定和流行病学调查，在此基础上可以制定在散射、伽马和X射线的低强度辐射影响下工作的医务人员的眼球晶状体和手部皮肤的辐射防护建议。

关键词：电离辐射源；工作人员；心血管内外科；放射性同位素诊断部门；眼球晶状体；手部皮肤；低强度散射辐射；年度等效剂量；热释光剂量测定法；职业行为。

To cite this article

Ryzhkin SA, Druzhinina YuV, Lantuh ZA, Soldatov IV, Lesnyak VN, Lebedev DP, Samochatov DN, Semenova MP, Sukhov VA, Okhrimenko SE. 使用现代医疗技术时医务人员受到辐射的问题. *Digital Diagnostics*. 2023;4(2):142–155. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD375327>

收到: 03.05.2023

接受: 25.05.2023

发布日期: 15.06.2023

ОБОСНОВАНИЕ

В настоящее время источники ионизирующего излучения широко применяются в современной медицинской практике. При использовании источников ионизирующего излучения в поле их воздействия попадают врачи и средний медицинский персонал кардиоэндоваскулярной хирургии (КЭВХ), травматологии, урологии, нейрохирургии, стоматологии, а также персонал операционных общей хирургии и реанимационных отделений.

В отделениях радионуклидной диагностики наибольшему облучению подвергается средний медицинский персонал, обеспечивающий подготовку и введение радиофармпрепаратов, а также рентгенолаборанты, осуществляющие обследование пациентов на гамма-камерах, а также методами однофотонной эмиссионной компьютерной томографии или позитронно-эмиссионной томографии, совмещённой с рентгеновской компьютерной томографией (ПЭТ/КТ). В этих случаях персонал находится непосредственно и постоянно в поле рассеянного гамма- и рентгеновского излучения низкой интенсивности, на глаза и кожу которого воздействует излучение, рассеянное телом пациента и отражённое от внешних объектов. Имеющиеся данные позволяют рассчитать отношение эквивалентной дозы на хрусталик глаза к эффективной дозе в диапазоне энергии фотонного излучения от 0,01 до 10 МэВ. Полученные результаты показывают, что в диапазоне энергий гамма-излучения от 0,06 до 10 МэВ эквивалентная доза в хрусталике глаза численно превышает эффективную дозу примерно на 20%, тогда как в диапазоне менее 0,05 МэВ это превышение составляет от нескольких раз до нескольких десятков раз.

Таким образом, соблюдение основного предела дозы по эффективной дозе уже не обеспечит соблюдение дозового предела при облучении хрусталика глаза. Если сильно проникающие виды излучения дают основной вклад в эффективную дозу, слабопроникающие излучения (бета-частицы, фотоны с энергией <15 кэВ) создают максимальные дозы в чувствительном слое кожи и в хрусталике глаза [1, 2]. Особую актуальность вопрос стал приобретать после соответствующих публикаций Международной комиссии по радиологической защите и Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ), обосновавших рекомендации о снижении предела эквивалентной дозы на хрусталик со 150 до 20 мЗв в год и оптимизации радиационной защиты персонала с учётом принципа ALARA (As Low As Reasonably Achievable) [3–9].

Цель исследования — оценка эквивалентных доз облучения хрусталика глаза и кожи рук медицинского персонала при проведении различных диагностических исследований под воздействием рентгеновского излучения и гамма-излучения радиофармпрепаратов и сравнение результатов с ранее опубликованными данными по дозам облучения хрусталика глаза и кожи рук медицинского персонала.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В рамках собственных исследований проведена оценка эквивалентных доз облучения хрусталика глаза и кожи рук в медицинских технологиях при воздействии рентгеновского излучения и гамма-излучения радиофармпрепаратов. Для оценки доз использовался метод термолюминесцентной дозиметрии (ТЛД). Применялись дозиметры индивидуального эквивалента дозы Нр(3) с детекторами ТЛД-1011Т (НТЦ «Практика», Россия) и ТЛД-100 (США). Диапазон измерений: 30 мкЗв–12 Зв для энергий 0,005–10 МэВ. Экспонирование дозиметров осуществлялось путём их крепления на центральной части фронтальной (лобной) поверхности медицинской шапочки персонала. Календарное время экспонирования составляло 3–6 недель, но фиксировалось общее количество операций с дозиметрией, которое и учитывалось при оценке и расчётах доз облучения.

Измерения детекторов осуществлялись на термолюминесцентном анализаторе HARSHAW TLD system 4000, Thermo Scientific Ltd (США) кафедры радиохимии МГУ имени М.В. Ломоносова. После снятия кривой термовысвечивания и отжига детекторов проводилась индивидуальная калибровка детекторов в воздухе источником гамма-излучения ^{137}Cs ($E_{\gamma}=661$ кэВ), тип Ц2-5. Основная погрешность измерения с доверительной вероятностью 0,95 не превышала 10%. Часть дозиметров экспонировалась в качестве контрольных для оценки вклада радиационного фона. В исследованиях, проводимых в период 2014–2021 годов в Москве (4 отделения КЭВХ трёх городских больниц, одно отделение урологии, эндоскопии, отделении КЭВХ медицинского центра системы ФМБА, ПЭТ-центр и отделение стоматологии частного медицинского центра, отделение радионуклидной диагностики клиники РМАНПО) и Казани (4 отделения КЭВХ в четырёх медицинских организациях), отмечено 61 наблюдение по эквивалентной дозе на хрусталик глаза, в том числе у персонала КЭВХ — 46 (врачи — 22, средний медицинский персонал — 24), эндоскопии — 2, стоматологии — 4, урологии — 1, у персонала отделений радионуклидной диагностики ($^{99\text{m}}\text{Tc}$ и ^{18}F) — 6.

Клиническое обследование сотрудников проведено с использованием офтальмологического осмотра: визометрии (с коррекцией и без коррекции); рефрактометрии, биомикроскопии конъюнктивы глазного яблока и стекловидного тела; пробы Норна; В-сканирования глаза.

Особенностью дизайна исследования является оценка индивидуальных доз облучения, не объединённых в единую статистическую совокупность в силу особенностей условий облучения каждого из обследуемых. Вместе с тем это дало возможность получить срез (диапазон) уровней доз облучения и факторов, потенциально влияющих на формирование дозы.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Существует несколько подходов к изучению эквивалентных доз на хрусталик глаза у персонала медицинских учреждений. Один из вариантов заключается в ношении термолюминесцентного дозиметра, закреплённого в определённом месте на голове медицинского персонала в течение заранее определённого времени, и измерении индивидуального эквивалента дозы на хрусталик H_p(3) по истечении периода ношения. Данный подход описан в методических рекомендациях МУ 2.6.1.3747-22¹. Подобные работы по измерению эквивалентных доз на хрусталик глаза у персонала медицинских учреждений г. Москвы были проведены в 2014 году среди работников различных специальностей совместно с лабораторией радиационного контроля кафедры радиохимии МГУ имени М.В. Ломоносова. Время экспонирования ТЛД H_p(3) составило один календарный месяц. Результаты представлены в табл. 1.

Наибольшие значения зафиксированы у врачей КЭВХ. Однако при полной передаче ответственности по ношению индивидуальных дозиметров на персонал возникают случаи потери части информации о количестве операций с дозиметрией, что является недостатком такого подхода. Недостатком является и недостоверность информации о реальном количестве операций с дозиметрами, в связи с чем измерение доз за отдельные периоды с последующим пересчётом на годовую дозу не является удачным вариантом для оценки радиационного воздействия.

Вторым подходом к оценке эквивалентной дозы на хрусталик глаза персонала является измерение накопленной дозы за определённое количество операций, сопровождавшихся индивидуальной дозиметрией. Данная методика позволила проводить оценку усреднённой дозы за одно условное интервенционное исследование. В зависимости от вида процедуры интервенционные исследования делятся на «диагностические» и «терапевтические». Диагностические интервенционные исследования, как правило, имеют длительность от 20 до 30 минут и общее время облучения примерно 3–7 минут.

Терапевтические интервенционные исследования протекают намного дольше (время зависит от сложности операции). В одном из наблюдений время операции составило 2,5 часа, а время включения высокого напряжения — 28 минут.

Результаты собственных исследований представлены в табл. 2–4.

Как видно, дозы за операцию (манипуляцию) существенно различаются как в разных технологиях, так и в пределах одной специальности. Обращает на себя внимание крайне высокая доза у медицинской сестры КЭВХ. Видимо, важным фактором являются приёмы работы конкретного специалиста (количество снимков и соотношение снимок/скопия и т.д.), и особенно расстояние от места расположения персонала — основного хирурга-оператора и его ассистента или медицинской сестры — до зоны прямого пучка. Последнее можно определить как «профессиональное поведение». Расчётные годовые дозы в учреждении «А» составили от 35 до 90 мЗв у врачей КЭВХ до 180 мЗв у медицинской сестры и 8 мЗв у медсестры отделения радионуклидной диагностики.

Результаты оценки доз на хрусталик глаза в учреждении «В» приведены в табл. 3. Так, расчётная годовая эквивалентная доза на хрусталик глаза в учреждении «В» составила 60 мЗв у врача, в то время как у среднего медицинского персонала — от 6 до 18 мЗв. Для показателя «профессиональное поведение» установлено, что вторая медсестра (показатель «медсестра-2») в силу особенностей своей работы находится, как правило, дольше и ближе к рабочему месту врача (показатель «врач-оператор»), чем первая медсестра (показатель «медсестра-1»).

Определённые особенности формирования доз на хрусталик глаза выявлены в учреждении «С». Наибольшая доза зафиксирована у врача с наименьшим количеством операций. Расчётные годовые дозы у врачей составили от 53 до 225 мЗв, у медицинской сестры — около 19 мЗв. Результаты измерений приведены в табл. 4.

Проведена оценка факторов, которые могут потенциально влиять на формирование дозы: количество «высокодозовых» операций, соотношение

Таблица 1. Результаты измерений H_p(3) и ориентировочной оценки годовой эквивалентной дозы на хрусталик глаза (H) у медицинских работников разных специальностей [10, 11]

Специальность	Число обследуемых, <i>n</i>	H _p (3), мЗв	H годовая, мЗв
Средний медперсонал (работа с радиофармпрепаратами, ^{99m} Tc)	2	0,37–0,40	4,4–4,8
Врач-ангиографист	6	0,31–2,20	3,7–26,4
Средний медперсонал (ангиография)	5	0,15–0,42	1,8–5,0
Врач-уролог	1	0,72	8,6
Врач-стоматолог	4	0,13–0,18	1,6–2,2

¹ Методические указания МУ 2.6.1.3747-22 «Контроль индивидуальных эквивалентных доз внешнего облучения хрусталиков глаз персонала» (утв. Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека 17.05.2022). Режим доступа: <https://base.garant.ru/405781929/>.

Таблица 2. Эквивалентные дозы на хрусталик глаза врачей и среднего персонала отделений кардиоэндоваскулярной хирургии, эндоскопии, радионуклидной диагностики в учреждении «А» [12, 13]

Специальность	Доза за экспозицию, мЗв	Количество операций с дозиметром	Доза за 1 операцию, мЗв	Допустимое количество операций в год	Примерное количество операций в год
Медсестра КЭВХ [CVS nurse]	12,6	31	0,4	50	450
Врач КЭВХ-1 [CS Physician-1]	1,28	13	0,1	200	350
Врач КЭВХ-2 [CVS Physician-2]	1,69	20	0,085	235	450
Врач КЭВХ-3 [CVS Physician-3]	1,05	5	0,2	100	450
Врач, эндоскопия [Endoscopic Physician]	2,82	58	0,05	400	380
Медсестра, эндоскопия [Endoscopic nurse]	2,79	58	0,05	400	380
Медсестра ^{99m} Tc [Nurse ^{99m} Tc]	0,7	134*	0,005	4000	1600

Примечание. * Пациенты.

Таблица 3. Эквивалентные дозы на хрусталик глаза врачей и среднего персонала отделения кардиоэндоваскулярной хирургии в учреждении «В»

Специальность	Доза за экспозицию, мЗв	Количество операций с дозиметром	Доза за 1 операцию, мЗв	Допустимое количество операций в год	Примерное количество операций в год
Врач	5,7	64	0,1	200	600
Медсестра-1	1,5	68	0,02	1000	300
Медсестра-2	2,4	41	0,06	340	300

Таблица 4. Эквивалентные дозы на хрусталик глаза врачей и среднего персонала отделения кардиоэндоваскулярной хирургии в учреждении «С»

Специальность	Доза за экспозицию, мЗв	Количество операций с дозиметром	Доза за 1 операцию, мЗв	Допустимое количество операций в год	Примерное количество операций в год
Врач-12	3,86	35	0,11	180	750
Врач-16	3,5	51	0,07	285	750
Врач-18	3,4	12	0,3	>70	750
Медсестра	1,74	68	0,025	800	750

функции оператор–ассистент, кумулятивная доза за время операций, рост оператора (табл. 5). Из таблицы видно, что ни один из приведённых факторов не имеет прямого влияния на результаты дозиметрии. Очевидно, важнейшим фактором облучения являются не только и, видимо, не столько количество операций, сколько их специфика и «профессиональное поведение», определяющие расстояние «врача-оператора» от рабочего места до трубки. В этом смысле определённое значение может принадлежать антропометрическим характеристикам (например, росту), влияющим на расположение персонала относительно зоны прямого пучка.

Необходимо также обратить внимание на определённую ограниченность имевшихся коллективных средств защиты и отсутствие индивидуальных средств защиты глаз во многих организациях. Стационарные средства защиты явно недостаточны: узенький подвесной экран; отсутствие или недостаточность навесных прозрачных экранов, наличие которых может существенно снижать требования и к защитным свойствам индивидуальных средств защиты (например, 0,15 мм Pb для защиты тела и 0,1 мм Pb для глаз). Это могло бы в целом улучшить и оздоровить условия труда медицинского персонала.

Таблица 5. Факторы, потенциально влияющие на формирование дозы облучения персонала

Врач	Соотношение операций с дозой на пациента >1 Гр / >2 Гр	Кумулятивная доза, Гр	Соотношение оператор/ассистент	Рост, см
Врач-12	19/5	39	24/11	183
Врач-16	17/5	49	29/22	185
Врач-18	3/1	9,4	12/0	170

Таблица 6. Дозы облучения хрусталика глаза (H_{lens}) и эффективная доза (E) у персонала диагностической лаборатории ПЭТ-центра в зависимости от активности радиофармпрепарата и количества пациентов [14]

Сотрудник	Операции	A, ГБк	Количество пациентов	H_{lens} , мЗв Hr(3)	E, мЗв Hr(10)
A	Медсестра, введение преобладает над фасовкой	109,2	283	0,63	0,53
B	Фасовщик, фасовка преобладает над введением	124,5	324	0,67	0,52
C	Рентгенолаборант ПЭТ/КТ, сканирование	135,2	354	0,8	0,81

Примечание. ПЭТ/КТ — позитронно-эмиссионная томография, совмещённая с рентгеновской компьютерной томографией.

Эквивалентные дозы на хрусталик глаза у медицинского персонала различных отделений лучевой диагностики сравнивали с данными дозовой нагрузки на персонал в диагностической лаборатории ПЭТ-центра. В работе [14] проведена оценка эквивалентных доз на хрусталик глаза у медицинского персонала ПЭТ-центра, работающего с препаратами на основе ^{18}F , в том числе изучены особенности временных затрат (рабочей нагрузки) персонала, работающего с ^{18}F (табл. 6).

Эквивалентная эффективная доза для персонала отделения радионуклидной диагностики ПЭТ-центра составила 4,2–4,9 мкЗв/ГБк (4,2–4,9 мкЗв/пациент) при операциях введение/фасовка и 6 мкЗв/ГБк (2,3 мкЗв/пациент) для рентгенолаборанта ПЭТ/КТ, по эквивалентной дозе на хрусталик глаза — 5,4–5,8 мкЗв/ГБк (2,1–2,2 мкЗв/пациент) и 5,9 мкЗв/ГБк (2,3 мкЗв/пациент) соответственно. Уровень облучения прямо зависел от суммарной используемой активности (или количества пациентов как «эквивалента» активности). Оценка зависимости доза–активность / доза–пациент даёт возможность проведения расчёта минимально необходимого персонала (штатной численности). Среди операций фасовка/введение наибольшая дозовая нагрузка сопряжена с операцией «введение», которая является главным дозообразующим фактором в данной технологии. Наибольшая доза облучения хрусталика с учётом рабочей нагрузки зарегистрирована у рентгенолаборанта ПЭТ/КТ, что объясняется его контактом со всей активностью, в то время как медицинская сестра и фасовщик в данном случае «делят» эту активность

между собой. Обращают на себя внимание практически близкие величины доз Hr(10) и Hr(3) при работе с радиофармпрепаратами. Предварительные расчётные оценки годовых эквивалентных доз на хрусталик, приведённые к 11 месяцам (за вычетом отпуска), представлены в табл. 7.

Наибольшая доза закономерно приходится на рентгенолаборанта КТ. При этом для него отмечено крайне осторожное «рабочее поведение» (выдержка максимальной дистанции, минимизация контакта). Рабочая нагрузка на персонал составила 26 пациентов за 14-часовую смену. Отметим также, что при интенсификации процесса приёма пациентов (исключение достаточно длительной процедуры регистрации) пропорционально возрастёт и дозовая нагрузка. Кроме того, очевидно, что при отсутствии деления активности между персоналом (a и b) эквивалентная доза на хрусталик глаза может составить не менее 15 мЗв за год. Полученные данные удовлетворительно согласуются с данными работ [15, 16], медианные и максимальные значения в которых составили от 4 до 14 и от 6 до 23 мЗв соответственно. Оценивая результаты, можно констатировать, что соотношение количества пациентов и количества персонала является важным фактором, определяющим уровни облучения среднего медицинского персонала отделений радионуклидной диагностики в конкретных технологиях.

Помимо оценки дозы на хрусталик проводилась оценка доз облучения кожи рук персонала отделений КЭВХ и радионуклидной диагностики. Результаты исследований

Таблица 7. Расчётные годовые эквивалентные дозы на хрусталик глаза персонала изотопной лаборатории ПЭТ-центра [12, 14]

Персонал	Рабочая функция	H, мЗв за год
A	Введение ~60%, фасовка 40%	6,9
B	Фасовка ~60%, введение 40%	7,4
C	Рентгенолаборант ПЭТ/КТ	8,8

Примечание. ПЭТ/КТ — позитронно-эмиссионная томография, совмещённая с рентгеновской компьютерной томографией.

Таблица 8. Примерная оценка годовых эквивалентных доз на кожу рук в кардиоэндоваскулярной хирургии [12, 14]

Персонал	H_{skin} за экспозицию, мЗв	Количество операций	Количество операций в год	H_{skin} годовая / расчётная
Медсестра КЭВХ	1,2	31	450	17
Врач КЭВХ-1	0,7	13	350	19
Врач КЭВХ-2	4,5	20	450	100
Врач КЭВХ-3	1,1	5	450	100

Примечание. КЭВХ — кардиоэндоваскулярная хирургия.

приведены в табл. 8. Как видно из таблицы, эквивалентные дозы в приведённых исследованиях не превышают предела эквивалентной дозы на кожу (500 мЗв); указанные измерения характеризуют отдельный локальный участок кожи (как правило, тыльная сторона среднего пальца) и, видимо, не могут полностью характеризовать дозы по всей поверхности кисти руки (как тыльной, так и ладонной поверхности). Авторам известно два случая развития на коже рук врачей КЭВХ видимых патологических изменений в виде постоянных локальных очагов сухого дерматита в области ладонно-наружного края обеих рук и покраснения тыльных поверхностей кожи кистей рук после проведения операций.

В рамках данной работы авторами проведены исследования доз облучения кожи на фантомах кистей рук хирургов КЭВХ. Полученные данные свидетельствуют о возможности облучения кожи кистей рук на уровне 1 Гр в год и более [13]. Проведённые оценки годовых эквивалентных доз кожи у специалистов отделений радионуклидной диагностики ПЭТ-центра, рассчитанные на 11 рабочих месяцев, приведены в табл. 9 [15].

Наибольший вклад в дозовую нагрузку медицинской сестры на кожу рук вносит операция введения радиофармпрепарата пациенту. Обращает на себя внимание деление дозовой нагрузки между медицинской сестрой-1 и «фасовщиком» (или медицинской сестрой-2). Очевидно, что в случае выполнения медицинской сестрой-1 100% инъекций эквивалентная доза на кожу кистей рук может составить около 450 мЗв за год. Приведённые данные хорошо сопоставимы с показателями работы [17], которые находились в диапазоне от 3 до 512 мЗв.

Для уточнения данных была проведена оценка эквивалентных доз в коже на фантоме кистей рук в отделении КЭВХ. Показано, что эквивалентные дозы на фантоме кистей рук за одну операцию находятся в диапазоне от 0,5–2,5 мЗв при средней входной дозе на фантом тела

пациента 500 мГр, и с учётом общего количества операций в год у конкретного хирурга (300–600 операций) эквивалентные дозы на локальных зонах кожи кистей рук могут превышать установленный предел дозы 500 мЗв. При исследовании двунитевых разрывов ДНК в фибробластах кожи, облучённых параллельно с дозиметрами, количество фокусов γH2AX и 53BP1 через 30 минут и до 24 часов после облучения статистически значимо ($p < 0,05$) превышало контрольные значения более чем в 2 раза, и даже через 72 часа показатели не снижались до контрольных значений [13, 18].

ОБСУЖДЕНИЕ

Проблема освещается в научной литературе достаточно давно [19–24]. Оценивались эквивалентные дозы на хрусталик глаза и кожу в интервенционных исследованиях за одну операцию. Дозы на хрусталик глаза находились в диапазоне от 0,05 до 0,4 мЗв, на кожу рук — от 0,3 до 1,1 мЗв. Разброс данных составляет примерно до 8 раз по хрусталику глаза и до 4 раз по коже рук. В исследовании [19] доза на кожу равна дозе на хрусталик за одну операцию. Существенно различаются значения эквивалентных доз на хрусталик глаза в интервенционных процедурах за одну операцию в зависимости от вида процедуры, наличия или отсутствия средств индивидуальной или коллективной защиты [2]. В силу значительной неопределённости имеющихся данных исследование доз облучения хрусталика глаза по-прежнему актуально. В работе [25] сообщалось о повышенной распространённости катаракты у медицинских работников, подвергшихся воздействию источников ионизирующего излучения, с более высокой распространённостью среди персонала КЭВХ.

В исследовании, проведённом в течение 17 месяцев, три радиолога выполняли педиатрические и взрослые вмешательства. В течение года проведено от 276 до

Таблица 9. Расчётные годовые эквивалентные дозы на кожу (H_p , 0,07), пальцев рук (средний палец) сотрудников изотопной лаборатории ПЭТ-центра

Персонал	Рабочая функция	H_p (0,07), мЗв за год
a	Введение ~60%, фасовка 40%	220
b	Фасовка ~60%, введение 40%	132
c	Рентгенолаборант ПЭТ/КТ	24

Примечание. ПЭТ/КТ — позитронно-эмиссионная томография, совмещённая с рентгеновской компьютерной томографией.

338 процедур, из них 20% педиатрических. Годовые дозы левого глаза превысили 20 мЗв и составили от 21 до 61 мЗв. Даже с защитой глаз специальными очками дозы превысили 6 мЗв и составили от 13 до 48 мЗв для обоих глаз. Не наблюдалось существенных различий в дозе на хрусталик за процедуру между детскими и взрослыми вмешательствами [26].

При исследовании дозовой нагрузки на хрусталик глаза у 9 интервенционных радиологов в течение 6 месяцев оценивалась эквивалентная доза на хрусталик глаза и кожу в области шеи. Доза на хрусталик составляла $0,18 \pm 0,11$ мЗв за рабочий день и $35,3 \pm 6,6$ мЗв за 200 рабочих дней. У 5 (56%) врачей КЭВХ доза превысила годовой предел (20 мЗв). По мнению исследователей, врачи КЭВХ, работающие полный рабочий день, могут страдать от детерминированного воздействия излучения на хрусталик глаза, особенно с левой стороны. Показана также возможность оценки доз облучения хрусталика по данным кожной дозиметрии в области шеи $[D_{\text{хруст.}} = 0,0179 + (0,5971 \times D_{\text{шея}})]$ [27].

Приведены результаты исследования среди 44 врачей КЭВХ и контрольной группы из 22 человек. Из общего количества обследуемых 26 врачей КЭВХ и участники контрольной группы прошли специальное исследование глаз. Дозы на хрусталик измерялись методом термoluminesцентной дозиметрии. Средняя эквивалентная доза у хирургов составила $0,83 \pm 0,59$ мЗв в месяц для левого и $0,35 \pm 0,38$ мЗв для правого глаза, в то время как годовые дозы оценивались от 0,7 до 11 мЗв. Обе группы существенно не отличались распространённостью ядерного или коркового помутнения хрусталика. У 4 врачей КЭВХ обнаружилась ранняя стадия субкапсулярного склероза, хотя статистических различий в группах не наблюдалось. Исследователи полагают, что данные указывают на возможность получения врачами КЭВХ значительных доз на хрусталик и рекомендуют использовать защиту глаз [28].

В исследовании [29] группа участников состояла из 69 интервенционных кардиологов и 78 контрольных лиц, профессионально не подвергавшихся воздействию ионизирующего излучения. Помутнения хрусталика были исследованы с помощью щелевой камеры. Кумулятивные дозы на хрусталик оценивались ретроспективно с использованием вопросника, включающего данные о профессиональной истории и дозах облучения хрусталика глаза. Средняя кумулятивная доза на хрусталик левого и правого глаза составила 224 и 85 мЗв соответственно. Ядерная опалесценция и помутнение ядра хрусталика в левом глазу были обнаружены у 47% врачей КЭВХ и 42% лиц контрольной группы, кортикальные помутнения — у 25 и 29%, задние субкапсулярные помутнения — у 7 и 6% соответственно. Наблюдалось некоторое статистически значимое увеличение риска непрозрачности в группе КЭВХ по сравнению с контрольной группой после корректировки на возраст, пол,

статус курения и медицинское воздействие, однако существенного увеличения случаев катаракты по сравнению с контролем не наблюдалось, в том числе не было доказательств повышенного риска непрозрачности при увеличении дозы. По мнению авторов, неблагоприятное воздействие ионизирующего излучения нельзя исключить из-за относительно небольшого размера выборки исследования.

В исследовании, связанном с оценкой доз на персонал медицинских учреждений Санкт-Петербурга получены следующие эквивалентные дозы на хрусталик глаза: у врачей-рентгенохирургов — от 0,29 до 2,9 мЗв за 1 месяц, врачей и медицинских сестёр КЭВХ — от 0,44 до 1,49 мЗв, рентгенологов — от 0,1 до 8,54 мЗв, хирургов — 0,89 мЗв, операционных сестёр — от 0,11 до 4,6 мЗв за 3 месяца экспозиции. Проведена оценка уровней облучения хрусталика на основе оценки соотношения значений индивидуальных эквивалентов дозы $\text{Hr}(3)$ и $\text{Hr}(10)$. Основываясь на параметрах годовых значений $\text{Hr}(3)$ и $\text{Hr}(10)$, аппроксимирующего логнормальное распределение, показано, что вероятность превышения значения 1 мЗв составляет 13%, вероятность превышения 6 мЗв — 10%, 20 мЗв — менее 1%. Вместе с тем, учитывая, что в медицине сотрудники рентгенохирургических бригад являются наиболее облучаемой группой, высказано предположение, что число превышений 20 мЗв за год может составлять до 10% случаев, а повреждения хрусталика могут носить стохастический (случайный) характер [30, 31]. Отмечено, что эти результаты существенно отличаются от аналогичных результатов, полученных в рамках Европейского проекта ORAMED (Optimization of Radiation Protection Medical Staff) [32–34], в котором проведено исследование доз облучения хрусталика глаза у интервенционных специалистов более чем 30 европейских медицинских центров: почти у 50% врачей КЭВХ доза облучения хрусталика глаза превысила 20 мЗв в расчёте на год.

Между тем влияние хронического облучения на развитие катаракты отмечено в когорте работников ПО «Маяк», где у 15 000 человек, подвергшихся гамма-облучению в дозах от $<0,25$ до >1 Гр, установлена статистически значимая линейная зависимость заболеваемости старческой катарактой от суммарной дозы внешнего гамма-облучения. Дальнейшие исследования показали повышенный риск заболеваемости катарактой всех типов: задней кортикальной, ядерной и субкапсулярной у работников, подвергавшихся хроническому облучению. Риск развития катаракты был существенно выше у женщин [35]. В результате радиационной аварии на Южном Урале дозы у населения составили до 5 мЗв у 793 человек, от 5 до 100 мЗв — у 517 и более 100 мЗв — у 67, и можно говорить об отдалённом периоде после облучения. Исследования показали значимое влияние дозы облучения. Отмечено появление помутнений в ядре хрусталика и задней капсуле [36].

В рассматриваемых медицинских технологиях персонал также подвергается хроническому облучению. По данным, полученным в Казани [37], эквивалентные дозы на хрусталик глаза у 11 врачей и 15 медицинских сестёр КЭВХ составили от <2 до 16,92 мЗв за 3 месяца. У 7 обследованных врачей из 21 эквивалентные дозы в хрусталике глаза превышали либо были близки к 20 мЗв в год. При клиническом обследовании у 5 из 7 врачей в возрасте от 30 до 70 лет выявлены гиперэхогенные включения в витреальной полости в отсутствие сосудистых изменений, характерных для пожилых людей; имелись изменения, характерные для синдрома сухого глаза (жалобы на неприятные ощущения в глазах, скудное отделяемое слизистого характера из конъюнктивальной полости, покраснение глаз в вечернее время, «мушки» в левом глазу, зуд, ощущение инородного тела, складка конъюнктивы снаружи от лимба, истончение слёзного ручья), а также снижение времени разрыва слёзной плёнки при проведении пробы Норна. У 4 из 5 обследуемых выявлена поверхностная инъекция конъюнктивы глазного яблока и у 1 врача — пигментация конъюнктивы. У 2 врачей (45 и 70 лет) определена сенильная дуга роговицы, описанная в литературе как изменение роговицы у пожилых людей (по данным Всемирной организации здравоохранения, пожилой возраст — 60 лет и более). При проведении клинического обследования у одного из врачей КЭВХ (возраст 34 года, годовая эквивалентная доза на хрусталик 18,7 мЗв) выявлена следующая патология органа зрения: поражение конъюнктивы глаза, синдром «сухого» глаза, поражение (деструкция) стекловидного тела, уплотнение ядра хрусталика. Авторы полагают, что выявленные изменения могут быть связаны с воздействием источников ионизирующего излучения. Указано на возможность развития патологического процесса под воздействием малых доз, обусловленного развитием окислительного стресса и высвобождением свободных радикалов [38, 39].

Ограничения исследования

Ограничения по временному интервалу от одного до нескольких месяцев; сбор данных по лучевой нагрузке медицинского персонала; ограниченный спектр организаций, в которых проводился сбор данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во всех случаях оценки годовых эквивалентных доз на хрусталик глаза с учётом количества проводимых операций расчётные годовые дозы врачей КЭВХ превышали уровень 20 мЗв и находилась в диапазоне от 35 до 90 мЗв, для среднего медицинского персонала — от 6 до 19 мЗв. В двух наблюдениях расчётная доза на хрусталик составила >150 мЗв (медсестра учреждения «А» — 185 мЗв, «врач-оператор» учреждения «С» — 225 мЗв).

Показано, что предел дозы на хрусталик может быть достигнут при проведении врачами КЭВХ более 200 операций, а в ряде наблюдений — менее 70 для врача и 50 для медицинской сестры.

Ведущим фактором формирования дозы облучения в КЭВХ является расстояние от рабочего места до зоны пучка рентгеновского излучения, которое в определённой степени связано с профессиональным поведением персонала.

На основании имеющихся данных можно предположить стохастический характер повреждения органа зрения в рассматриваемом диапазоне доз.

Воздействие, возможно, может проявляться развитием патологии в более раннем возрасте, нежели у лиц, не подверженных облучению, даже при отсутствии статистических различий в группах сравнения.

Дозы на кожу рук персонала различных специальностей могут быть близки и даже превышать нормируемый годовой предел (500 мЗв) в 2 раза и более.

На данном этапе, помимо мониторинга уровней облучения отдельных органов и тканей у персонала в современных медицинских технологиях, необходима организация эпидемиологических исследований и разработка практических рекомендаций по защите с применением средств индивидуальной и коллективной защиты с учётом факторов, влияющих на формирование доз облучения.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении поисково-аналитической работы.

Конфликт интересов. Данная статья подготовлена авторским коллективом в рамках 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 г. № 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" Департамента здравоохранения города Москвы.

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: С.А. Рыжкин — идея работы, проведение экспериментальных исследований, сбор материала, подготовка статьи; Ю.В. Дружинина, З.А. Лантух — поиск публикаций по теме, подготовка и редактирование статьи; И.В. Солдатов — подготовка и редактирование статьи; В.Н. Лесняк, Д.П. Лебедев, Д.Н. Самочатов — организация исследований, сбор материала; М.П. Семенова — подготовка и редактирование, перевод на английский язык; В.А. Сухов — поиск

публикаций по теме, организация исследований, сбор материала; С.Е. Охрименко — поиск публикаций по теме, идея работы, проведение экспериментальных исследований, сбор материала, подготовка статьи.

Благодарности. Авторы выражают искреннюю благодарность академику РАН Л.А. Ильину за его рекомендации в области мониторинга хрусталика глаза и разработки мер по защите органа зрения.

ADDITIONAL INFORMATION

Funding source. This article was prepared by a group of authors as a 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов С.И., Логинова С.В., Аكوпова Н.А., и др. Проблемы дозиметрии хрусталика глаза // Радиобиология и радиационная безопасность. 2014. Т. 59, № 4. С. 67–72.
2. International Commission on Radiological Protection [интернет]. ICRP, 1996. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. ICRP Publication 74. Ann. ICRP 26 (3–4). Режим доступа: <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP+Publication+74>. Дата обращения: 15.04.2023.
3. International Atomic Energy Agency [интернет]. Radiation protection and safety of radiation sources: International basic safety standards. Interim edition. IAEA, 2011. 329 p.
4. International Atomic Energy Agency [интернет]. Radiation protection and safety of radiation sources: International basic safety standards. No. GSR Part 3. Vienna, IAEA, 2015. 436 p. Режим доступа: <https://www.iaea.org/publications/8930/radiation-protection-and-safety-of-radiation-sources-international-basic-safety-standards>. Дата обращения: 15.04.2023.
5. International Commission on Radiological Protection [интернет]. ICRP, 2007. The 2007 recommendations of the international commission on radiological protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2–4). Режим доступа: <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20103>. Дата обращения: 15.04.2023.
6. International Commission on Radiological Protection [интернет]. ICRP statement on tissue reactions. Ref. 4825-3093-1464, April 21, 2011. Режим доступа: <https://icrp.org/docs/2011%20Seoul.pdf>. Дата обращения: 15.04.2023.
7. International Commission on Radiological Protection [интернет]. Implications for occupational radiation protection of the new dose limit for the lens of the eye. Interim guidance for use and comment. Draft 1. ICRP, 2013. 110 p. Режим доступа: <https://www.iaea.org/publications/10628/implications-for-occupational-radiation-protection-of-the-new-dose-limit-for-the-lens-of-the-eye>. Дата обращения: 15.04.2023.
8. International Commission on Radiological Protection [интернет]. ICRP, 2012 ICRP statement on tissue reactions / early and late effects of radiation in normal tissues and organs: threshold doses for tissue reactions in a radiation protection context. ICRP Publication 118. Ann. ICRP 41(1/2). Режим доступа: <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20118>. Дата обращения: 15.04.2023.
9. UNSCEAR 2010 Report [интернет]. Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 2010. Summary of low-dose radiation effects on health. United Nations, New York, 2011. P. 51–64. Режим доступа: https://www.unscear.org/docs/reports/2010/UNSCEAR_2010_Report_M.pdf. Дата обращения: 15.04.2023.
10. Карпов Н.А., Охрименко С.Е., Иванов С.И., и др. Доза в хрусталике глаза: ближайшие перспективы // Всероссийская конференция с международным участием, посвященная 85-летию со дня рождения В.А. Кухтина: сборник материалов. Чебоксары, 3–4 апреля. Чебоксары, 2014. С. 235–236.
11. Nuclear Energy Agency [интернет]. NEA Expert Group on the Dose Limit for the lens of the eye launches survey. nuclear energy agency [cite 2020 April 8]. Режим доступа: https://oecd-nea.org/jcms/pl_40031/nea-expert-group-on-the-dose-limit-for-the-lens-of-the-eye-launches-survey. Дата обращения: 15.04.2023.
12. Коренков И.П., Охрименко С.Е., Шандала Н.К., и др. Оценка доз облучения хрусталика глаза и кожи персонала в современных медицинских технологиях // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2022. Т. 67, № 1. С. 44–49. doi: 10.12737/1024-6177-2022-67-1-44-49
13. Охрименко С.Е., Осипов А.Н., Коренков И.П., и др. Оценка доз облучения кожи рук в кардиоэндоваскулярной хирургии и количества двунилевых разрывов ДНК в культуре фибробластов кожи на фантоме кистей рук // Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Радиационная гигиена и непрерывное профессиональное

- образование: новые вызовы и пути развития», посвященная 65-летию кафедры радиационной гигиены и радиационной безопасности имени академика Ф.Г. Кроткова»: сборник тезисов, 27 октября 2022 года. Москва, 2022. С. 64–68.
- 14.** Охрименко С.Е., Коренков И.П., Прохоров Н.И., и др. Радиационно-гигиеническая оценка современных медицинских технологий // Гигиена и санитария. 2020. Т. 99, № 9. С. 939–946. doi: 10.47470/0016-9900-2020-99-9-939-946
- 15.** Шлеенкова Е.Н., Бажин С.Ю., Кайдановский Г.Н., и др. О необходимости проведения регулярного контроля доз облучения хрусталиков глаз у персонала, занятого на работах с использованием радиофармацевтических препаратов // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 3. doi: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-101-111
- 16.** Wrzesień M. 18F-FDG production procedures as a source of eye lens exposure to radiation // J Radiol. 2018. Vol. 38, N 1. P. 382–393. doi: 10.1088/1361-6498/aaa287
- 17.** Wrzesień M. The effect of work system on the hand exposure of workers in 18F-FDG production centers // Australasian Physical Engineering Sci Med. 2018. Vol. 41. P. 541–548. doi: 10.1007/s13246-018-0644-9
- 18.** Охрименко С.Е., Коренков И.П., Яшкина Е.И., и др. Облучение кожи кистей рук в интервенционной кардиохирургии (доклад) // III Национальный конгресс с международным участием «Сысинские чтения», 16–18 ноября 2022 г. Москва, 2022.
- 19.** McParland B.J., Nosil J., Barry B. A survey of radiation exposure received by the staff at two cardiac catheterization laboratories // Br J Radiol. 1990. Vol. 63, N 755. P. 885–888. doi: 10.1259/0007-1285-63-755-885
- 20.** Steffanino G., Rossetti V., Rubichini F., et al. Short communication: Staff dose reduction during coronary angiography using low framing speed // Br J Radiol. 1996. Vol. 69, N 825. P. 860–864. doi: 10.1259/0007-1285-69-825-860
- 21.** Li I.B., Kai M., Takano K., et al. Occupational exposure in pediatric cardiac catheterization // Health Phys. 1995. Vol. 69, N 2. P. 261–264. doi: 10.1097/00004032-199508000-00011
- 22.** Medeiros R.D., Mennucci T.A. [Evolution of X-ray exposure dosage during coronary cineangiography. (In Portuguese)] // Arg Bras Cardiol. 1990. Vol. 55, N 1. P. 31–33.
- 23.** Karppinen J., Parviainen T., Servomaa A., Komppa T. Radiation risk and exposure of radiologists and patients during coronary angiography and percutaneous transluminal coronary angioplasty (PTCA) // Radiation Protection Dosimetry. 1995. Vol. 57, N 1–4. P. 481–485.
- 24.** David E.F., Andrew K., Christopher O., et al. The risk of radiation exposure to the eyes of the interventional pain // Physician Radiology Research and Practice. 2011. Vol. 2011. P. 609537. doi: 10.1155/2011/609537
- 25.** Vecchia E.D., Modenese A., Loney T. Risk of cataract in health care workers exposed to ionizing radiation: A systematic review // Med Lav. 2020. Vol. 111, N 4. P. 269–284. doi: 10.23749/mdl.v111i4.9045
- 26.** Morcillo A.B., Alejo L., Huerga C., et al. Occupational doses to the eye lens in pediatric and adult noncardiac interventional radiology procedures // Medical Physics. 2021. Vol. 48, N 4. P. 1956–1966. doi: 10.1002/mp.14753
- 27.** Merrachi N.A., Bouchard-Bellavance R., Perreault P. Eye lens dosimetry in interventional radiology: Assessment with dedicated Hp(3) dosimeters // Can Assoc Radiol J. 2021. Vol. 72, N 2. P. 317–323. doi: 10.1177/0846537120911755
- 28.** Thrapsanioti Z., Askounis P., Datsiris I. Eye lens radiation exposure in Greek interventional cardiology article // Radiat Prot Dosimetry. 2017. Vol. 175, N 3. P. 344–356. doi: 10.1093/rpd/ncw356
- 29.** Domienik-Andrzejewska J., Kałużny P., Piernik G. Occupational exposure to ionizing radiation and lens opacity in interventional cardiologists // International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health. 2019. Vol. 32, N 5. P. 663–675. doi: 10.13075/ijomh.1896.01456
- 30.** Кайдановский Г.Н., Шлеенкова Е.Н. On problems of the lens of the eye radiation dose monitoring // Радиационная гигиена. 2016. Т. 9, № 3. С. 75–80. doi: 10.21514/1998-426X-2016-9-3-75-80
- 31.** Шлеенкова Е.Н., Голиков В.Ю., Кайдановский Г.Н., и др. Результаты контроля доз облучения хрусталиков глаз у медицинского персонала г. Санкт-Петербурга // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 4. С. 29–36. doi: 10.21514/1998-426X-2019-12-4-29-36
- 32.** UPCommons. Global access to UPC knowledge [интернет]. Ginjaume M., Carnicer A. Oramed: Optimization of radiation protection of medical staff. 2012. EURADOS Report 2012-02. Режим доступа: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/17229>. Дата обращения: 15.04.2023.
- 33.** Vanhavere F., Carinou E., Domienik J., et al. Measurements of eye lens doses in interventional radiology and cardiology: Final results of the ORAMED project // Radiation Measurements. 2011. Vol. 46, N 11. P. 1243–1247. doi: 10.1016/j.radmeas.2011.08.013
- 34.** EUR-Lex [интернет]. Council Directive 2013/59/Euratom of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation, and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom. Режим доступа: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2013/59/oj>. Дата обращения: 15.04.2023.
- 35.** Азизова Т.В., Хамада Н., Григорьева Е.С., и др. Риск катаракты различных типов в когорте работников, подвергшихся профессиональному хроническому облучению // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2020. Т. 65, № 4. С. 48–57. doi: 10.12737/1024-6177-2020-65-4-48-57
- 36.** Микрюкова Л.Д., Крестинина Л.Ю., Епифанова С.Б. Изучение послойных изменений хрусталика в процессе формирования катаракты у лиц, подвергшихся облучению в результате радиационных инцидентов на Южном Урале // Радиационная гигиена. 2018. Т. 11, № 4. С. 51–63. doi: 10.21514/1998-426X-2018-11-4-51-63
- 37.** Рыжкин С.А., Слесарева А.Н., Галева Г.З., и др. Клиническое изучение органа зрения и дозиметрия хрусталика глаза персонала, выполняющего хирургические вмешательства под контролем рентгеновского излучения // Радиация и риск. 2017. Т. 26, № 3. С. 90–99. doi: 10.21870/0131-3878-2017-26-3-90-99
- 38.** Галева Г.З., Рыжкин С.А., Сергеева С.Ю. Воздействие ионизирующего излучения на человека и орган зрения // Практическая медицина. 2016. Т. 99, № 7. С. 37–41.
- 39.** Рыжкин С.А., Галева Г.З., Сергеева С.Ю. Лучевая катаракта в свете современных научно-исследовательских достижений в офтальмологии (обзор) // Вестник медицинского института «РЕАВИЗ»: реабилитация, врач и здоровье. 2016. Т. 24, № 4. С. 37–42.

REFERENCES

1. Ivanov SI, Loginova SV, Akopova NA, et al. Problems of dosimetry of the eye lens. *Med Radiol Radiation Safety*. 2014;59(4):67–72. (In Russ).
2. International Commission on Radiological Protection [Internet]. ICRP, 1996. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. ICRP Publication 74. Ann. ICRP 26 (3-4). Available from: <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP+Publication+74>. Accessed: 15.04.2023.
3. International Atomic Energy Agency [Internet]. Radiation protection and safety of radiation sources: International basic safety standards. Interim edition. IAEA; 2011. 329 p.
4. International Atomic Energy Agency [Internet]. Radiation protection and safety of radiation sources: International basic safety standards. No. GSR Part 3. Vienna, IAEA; 2015. Available from: <https://www.iaea.org/publications/8930/radiation-protection-and-safety-of-radiation-sources-international-basic-safety-standards>. Accessed: 15.04.2023.
5. International Commission on Radiological Protection [Internet]. CRP, 2007. The 2007 recommendations of the international commission on radiological protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2-4). Available from: <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20103>. Accessed: 15.04.2023.
6. International Commission on Radiological Protection [Internet]. ICRP statement on tissue reactions. Ref. 4825-3093-1464, April 21, 2011. Available from: <https://icrp.org/docs/2011%20Seoul.pdf>. Accessed: 15.04.2023.
7. International Commission on Radiological Protection [Internet]. Implications for occupational radiation protection of the new dose limit for the lens of the eye. Interim guidance for use and comment. Draft 1. ICRP; 2013. Available from: <https://www.iaea.org/publications/10628/implications-for-occupational-radiation-protection-of-the-new-dose-limit-for-the-lens-of-the-eye>. Accessed: 15.04.2023.
8. International Commission on Radiological Protection [Internet]. ICRP, 2012 ICRP statement on tissue reactions / early and late effects of radiation in normal tissues and organs: threshold doses for tissue reactions in a radiation protection context. ICRP Publication 118. Ann. ICRP 41(1/2). Available from: <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20118>. Accessed: 15.04.2023.
9. UNSCEAR 2010 Report [Internet]. Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 2010. Summary of low-dose radiation effects on health. United Nations, New York; 2011. Available from: https://www.unscear.org/docs/reports/2010/UNSCEAR_2010_Report_M.pdf. Accessed: 15.04.2023.
10. Karpov NA, Okhrimenko SE, Ivanov SI, et al. Dose in the lens of the eye. In: All-Russian conference with international participation dedicated to the 85th anniversary of the birth V.A. Kuhtina: Collection of materials, 3–4 April. Cheboksary, 2014. P. 235–236. (In Russ).
11. Nuclear Energy Agency [Internet]. NEA Expert Group on the Dose Limit for the lens of the eye launches survey. nuclear energy agency [cite 2020 April 8]. Available from: https://oecd-nea.org/jcms/pl_40031/nea-expert-group-on-the-dose-limit-for-the-lens-of-the-eye-launches-survey. Accessed: 15.04.2023.
12. Okhrimenko SE, Korenkov IP, Shandala NK, et al. Dose assessment to the lens of the eye and skin of the personnel in advanced medical technologies. *Med Radiol Radiation Safety*. 2022;67(1):44–49. (In Russ).
13. Okhrimenko SE, Osipov AN, Korenkov IP, et al. Assessment of doses of irradiation of the skin of the hands in cardioendovascular surgery and the number of double-strand DNA breaks in the culture of skin fibroblasts on the phantom of the hands. In: Collection of abstracts of the All-Russian scientific and practical conference with international participation “Radiation hygiene and continuing professional education: New challenges and ways of development” dedicated to the 65th anniversary of the Department of Radiation Hygiene and Radiation Safety named after Academician F.G. Krotkov”, October 27, 2022. Moscow; 2022. P. 64–68. (In Russ).
14. Okhrimenko SE, Korenkov IP, Prokhorov NI, et al. Radiation-hygienic assessment of modern medical technologies. *Hygiene Sanitation*. 2020;99(9):939–946. (In Russ). doi: 10.47470/0016-9900-2020-99-9-939-946
15. Shleenkova EN, Bazhin SY, Kaidanovsky GN, et al. The necessity of regular dose monitoring for the eye lens of the staff working with radiopharmaceuticals. *Radiation Hygiene*. 2021;14(3):101–111. (In Russ). doi: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-101-111
16. Wrzesień M. 18F-FDG production procedures as a source of eye lens exposure to radiation. *J Radiol*. 2018;(38):382–393. doi: 10.1088/1361-6498/aaa287
17. Wrzesień M. The effect of work system on the hand exposure of workers in 18F-FDG production centers. *Australasian Physical Engineering Sciences Med*. 2018;41(2):541–548. doi: 10.1007/s13246-018-0644-9
18. Okhrimenko SE, Korenkov IP, Yashkina EI, et al. Irradiation of the skin of the hands in interventional cardiac surgery (report). In: III National Congress with international participation “Sysis readings”, November 16–18, 2022. Moscow; 2022. (In Russ).
19. McParland BJ, Nosil J, Barry B. A survey of radiation exposure received by the staff at two cardiac catheterization laboratories. *Br J Radiol*. 1990;63(755):885–888. doi: 10.1259/0007-1285-63-755-885
20. Steffanino G, Rossetti V, Rubichini F, et al. Short communication: Staff dose reduction during coronary angiography using low framing speed. *Br J Radiol*. 1996;69(825):860–864. doi: 10.1259/0007-1285-69-825-860
21. Li IB, Kai M, Takano K, et al. Occupational exposure in pediatric cardiac cauterization. *Health Phys*. 1995;69(2):261–264. doi: 10.1097/00004032-199508000-00011
22. Medeiros RD, Mennucci TA. [Evolution of X-ray exposure dosage during coronary cineangiography. (In Portuguese)] *Arg Bras Cardiol*. 1990;55(1):31–33.
23. Karppinen J, Parviainen T, Servomaa A, Komppa T. Radiation risk and exposure of radiologists and patients during coronary angiography and percutaneous transluminal coronary angioplasty (PTCA). *Radiation Protection Dosimetry*. 1995;57(1-4):481–484.
24. David EF, Andrew K, Christopher O, Sanjog P. The risk of radiation exposure to the eyes of the interventional pain. *Physician Radiol Res Practice*. 2011;2011:609537. doi: 10.1155/2011/609537
25. Vecchia ED, Modenese A, Loney T. Risk of cataract in health care workers exposed to ionizing radiation: A systematic review. *Med Lav*. 2020;111(4):269–284. doi: 10.23749/md.lv111i4.9045
26. Morcillo AB, Alejo L, Huerga C, et al. Occupational doses to the eye lens in pediatric and adult noncardiac interventional radiology procedures. *Med Physics*. 2021;48(4):1956–1966. doi: 10.1002/mp.14753
27. Merrachi NA, Bouchard-Bellavance R, Perreault P. Eye lens dosimetry in interventional radiology: Assessment with dedicated Hp(3) dosimeters. *Can Assoc Radiol J*. 2021;72(2):317–323. doi: 10.1177/0846537120911755
28. Thrapsanioti Z, Askounis P, Datseris I, et al. Eye lens radiation exposure in Greek interventional cardiology article. *Radiation Protection Dosimetry*. 2017;175(3):344–356. doi: 10.1093/rpd/ncw356

29. Domienik-Andrzejewska J, Kałużny P, Piernik G. Occupational exposure to ionizing radiation and lens opacity in interventional cardiologists. *Int J Occupational Med Environmental Health*. 2019;32(5):663–675. doi: 10.13075/ijomh.1896.01456
30. Kaydanovsky GN, Shleenkova EN. On problems of the lens of the eye radiation dose monitoring. *Radiation Hygiene*. 2016;9(3):75–80. (In Russ). doi: 10.21514/1998-426X-2016-9-3-75-80
31. Shleenkova EN, Golikov VY, Kaidanovsky GN, et al. Results of eye lens doses control of medical personnel in St. Petersburg. *Radiation Hygiene*. 2019;12(4):29–36. (In Russ). doi: 10.21514/1998-426X-2019-12-4-29-36
32. UPCommons. Global access to UPC knowledge [Internet]. Ginjaume M, Carnicer A. Oramed: Optimization of radiation protection of medical staff. 2012. EURADOS Report 2012-02. Available from: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/17229>. Accessed: 15.04.2023.
33. Vanhavere F, Carinou E, Domienik JL, et al. Measurements of eye lens doses in interventional radiology and cardiology: Final results of the ORAMED project. *Radiation Measurements*. 2011;46(11):1243–1244. doi: 10.1016/j.radmeas.2011.08.013
34. EUR-Lex [Internet]. Council Directive 2013/59/Euratom of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation, and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom. Available from: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2013/59/oj>. Accessed: 15.04.2023.
35. Azizova TV, Hamada N, Grigorjeva ES, Bragin EV. Risk of various types of cataracts in the cohort of workers exposed to occupational chronic radiation. *Med Radiology Radiation Safety*. 2020;65(4):48–57. (In Russ). doi: 10.12737/1024-6177-2020-65-4-48-57
36. Mikryukova LD, Krestinina LY, Epiphanova SB. A study of layered lens change in the process of cataract formation in persons exposed to radiation as a result of radiation accidents in the Southern Urals. *Radiation Hygiene*. 2018;11(4):51–63. (In Russ). doi: 10.21514/1998-426X-2018-11-4-51-63
37. Ryzhkin SA, Slesareva AN, Galeeva GZ, Ivanov SI. Clinical examination of the eyes functional status and assessment of equivalent dose to eye lens in medical staff performing endovascular interventions under X-ray guidance. *Radiation Risks*. 2017;26(3):90–99. (In Russ). doi: 10.21870/0131-3878-2017-26-3-90-99
38. Galeeva GZ, Ryzhkin SA, Sergeeva SU. The effect of ionizing radiation on a person and the organ of vision. *Practical Med*. 2016; 99(7): 37–41. (In Russ).
39. Ryzhkin SA, Galeeva GZ, Sergeeva SU. Radiation cataract in the light of modern research achievements in ophthalmology (review). *Bulletin Medical Institute REAVIZ: Rehabilitation Doctor Health*. 2016;24(4):37–42. (In Russ).

ОБ АВТОРАХ

* Дружинина Юлия Владимировна;

адрес: Россия, 127051, Москва, ул. Петровка, д. 24, стр. 1;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3230-3722>;
eLibrary SPIN: 1973-2848; e-mail: druzhininaYV2@zdrav.mos.ru

Рыжкин Сергей Александрович;

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2595-353X>;
eLibrary SPIN: 5955-5712; e-mail: rsa777@inbox.ru

Лантух Зоя Александровна;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6623-9610>;
eLibrary SPIN: 5486-6496; e-mail: LantukhZA@zdrav.mos.ru

Солдатов Илья Владимирович;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4867-0746>;
eLibrary SPIN: 4065-6048; e-mail: SoldatovIV2@zdrav.mos.ru

Лесняк Виктор Николаевич;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2739-0649>;
eLibrary SPIN: 5483-3113; e-mail: lesnyak_kb83@mail.ru

Лебедев Дмитрий Петрович;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1551-3127>;
eLibrary SPIN: 4770-5722; e-mail: lebedevdp@gmail.com

Самочатов Денис Николаевич;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5230-2006>;
eLibrary SPIN: 3340-2715; e-mail: dnsamochatov@gmail.com

Семенова Мария Петровна;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0904-0415>;
eLibrary SPIN: 7205-0062; e-mail: mps-fmbc@yandex.ru

Сухов Виталий Александрович;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2993-0108>;
e-mail: cyxowv@gmail.com

Охрименко Сергей Евгеньевич;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8282-1798>;
eLibrary SPIN: 6595-4011; e-mail: ooniii@mail.ru

AUTHORS' INFO

* Yuliya V. Druzhinina;

address: 24/1 Petrovka street, 127051 Moscow, Russia;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3230-3722>;
eLibrary SPIN: 1973-2848; e-mail: druzhininaYV2@zdrav.mos.ru

Sergey A. Ryzhkin;

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2595-353X>;
eLibrary SPIN: 5955-5712; e-mail: rsa777@inbox.ru

Zoya A. Lantukh;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6623-9610>;
eLibrary SPIN: 5486-6496; e-mail: LantukhZA@zdrav.mos.ru

Ilya V. Soldatov;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4867-0746>;
eLibrary SPIN: 4065-6048; e-mail: SoldatovIV2@zdrav.mos.ru

Viktor N. Lesnyak;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2739-0649>;
eLibrary SPIN: 5483-3113; e-mail: lesnyak_kb83@mail.ru

Dmitriy P. Lebedev;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1551-3127>;
eLibrary SPIN: 4770-5722; e-mail: lebedevdp@gmail.com

Denis N. Samochatov;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5230-2006>;
eLibrary SPIN: 3340-2715; e-mail: dnsamochatov@gmail.com

Maria P. Semenova;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0904-0415>;
eLibrary SPIN: 7205-0062; e-mail: mps-fmbc@yandex.ru

Vitaly A. Sukhov;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2993-0108>;
e-mail: cyxowv@gmail.com

Sergey E. Okhrimenko;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8282-1798>;
eLibrary SPIN: 6595-4011; e-mail: ooniii@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD284706>

Поражение сердца при COVID-19: вопросы патогенеза и диагностики

Д.А. Филатова¹, Е.А. Мершина^{1, 2}, В.Е. Сеницын^{1, 2}

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, факультет фундаментальной медицины, Москва, Российская Федерация

² Медицинский научно-образовательный центр Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Тема коронавирусной инфекции до настоящего времени не теряет своей актуальности в медицинской среде. Среди гетерогенных клинических проявлений этого заболевания выделяют поражение структур сердца, главным образом воспалительного характера. Помимо миокардита, при коронавирусной инфекции возможен целый спектр острых или отсроченных поражений сердца, в частности острый коронарный синдром, тромбоэмболические события, сердечная недостаточность, нарушения ритма сердца. Известно, что прогноз для пациентов с поражением сердца значительно ухудшается. Своевременная постановка диагноза и начало лечения играют принципиально важную роль для предотвращения тяжёлых осложнений.

В обзоре приводятся современные литературные данные о патогенезе поражения сердца при COVID-19, обсуждаются вопросы рациональной диагностики данной патологии с помощью современных методик (лабораторных, функциональных, визуализирующих), в том числе инвазивных. Главную роль среди визуализирующих методов играет магнитно-резонансная томография сердца с контрастированием. В настоящее время признано, что диагностика миокардита, ассоциированного с коронавирусной инфекцией, имеет ряд принципиальных отличий от диагностики миокардита другой природы. Кроме того, отражены основные аспекты воспалительного поражения сердца, ассоциированного с вакцинацией против COVID-19, поскольку такое осложнение возникает чаще, чем принято считать. Нередко оно является поводом для отказа от вакцинации, что может повлечь за собой тяжёлые последствия как для отдельного человека, так и популяции в целом.

Ключевые слова: COVID-19; миокардит; острый коронарный синдром; нарушения ритма сердца; магнитно-резонансная томография; вакцинация.

Как цитировать

Филатова Д.А., Мершина Е.А., Сеницын В.Е. Поражение сердца при COVID-19: вопросы патогенеза и диагностики // *Digital Diagnostics*. 2023. Т. 4, № 2. С. 156–169. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD284706>

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD284706>

COVID-19-related cardiac lesion: The questions of pathogenesis and diagnostics

Daria A. Filatova¹, Elena A. Merzhina^{1,2}, Valentin E. Sinitsyn^{1,2}

¹ Faculty of Fundamental Medicine of Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

² Medical Research and Education Center of Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Coronavirus infection is still a topic of interest in the medical community today. Among the heterogeneous clinical manifestations of this disease, lesions of cardiac structures often occur. They are mainly inflammatory in nature and can be acute or delayed. Aside from myocarditis, coronavirus infection can induce cardiac injuries, including acute coronary syndrome, thromboembolic events, heart failure, and heart rhythm disturbances. It is well known that the prognosis for patients with cardiac lesions significantly worsens; timely diagnosis and treatment initiation play an important role in preventing severe complications.

This review presents the most recent literature data on the pathogenesis of cardiac lesions in COVID-19 patients and discusses the rational diagnosis of this pathology using modern techniques, such as laboratory, functional imaging (cardiac magnetic resonance is the most important of these), and invasive ones. It is now established that diagnosing myocarditis caused by coronavirus infection differs fundamentally from diagnosing other types of myocarditis. Furthermore, the main aspects of inflammatory heart lesions associated with COVID-19 vaccination are discussed, as this complication occurs more frequently than is commonly believed. It is often used as a rationale for refusing vaccination; however, this decision may severely affect the individual and the population.

Keywords: acute coronary syndrome; COVID-19; heart rhythm disturbances; magnetic resonance imaging; myocarditis; vaccination.

To cite this article

Filatova DA, Merzhina EA, Sinitsyn VE. COVID-19-related cardiac lesion: The questions of pathogenesis and diagnostics. *Digital Diagnostics*. 2023;4(2):156–169. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD284706>

Received: 25.02.2023

Accepted: 31.03.2023

Published: 14.04.2023

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD284706>

COVID-19的心脏受损：发病机制和诊断的问题

Daria A. Filatova¹, Elena A. Merzhina^{1,2}, Valentin E. Sinitsyn^{1,2}

¹ Faculty of Fundamental Medicine of Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

² Medical Research and Education Center of Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

简评

冠状病毒感染仍然是医学界的一个热门话题。心脏结构受损从该病的异质性临床表现中脱颖而出，主要是炎性的。除心肌炎外，冠状病毒感染还可导致一系列急性或迟发性的心脏受损，如急性冠状动脉综合征、血栓栓塞性事件、心力衰竭和心律失常。众所周知，有心脏受损的病人的预后大幅度恶化。及时诊断和启动治疗对于严重并发症的预防至关重要。

本综述介绍了与COVID-19心脏受损发病机制有关的现代文献资料，讨论了利用现代技术（实验室、功能、影像学），包括侵入性技术，对这种病理进行合理诊断的问题。在影像技术中起主要作用的是心脏超影磁共振成像。现在专家认为，与冠状病毒感染有关的心肌炎诊断，与其他心肌炎诊断相比，有一些根本区别。此外，还反映了与COVID-19疫苗接种相关的炎症性心脏受损的主要方面，因为这种并发症的发生率比通常认为的高。它往往是不打疫苗的一个理由，这对个人和整个人群都会产生严重的后果。

关键词： COVID-19；心肌炎；急性冠状动脉综合征；心律失常；磁共振成像；疫苗接种。

To cite this article

Filatova DA, Merzhina EA, Sinitsyn VE. COVID-19的心脏受损：发病机制和诊断的问题. *Digital Diagnostics*. 2023;4(2):156-169.

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD284706>

收到: 25.02.2023

接受: 31.03.2023

发布日期: 14.04.2023

ВВЕДЕНИЕ

Коронавирусная инфекция, вызываемая вирусом SARS-CoV-2, впервые была обнаружена в декабре 2019 года и в течение короткого периода времени стремительно распространилась по всему миру. Диапазон клинических проявлений заболевания охватывает все симптомы гриппозного синдрома, включая кашель, лихорадку, усталость, одышку, аносмию, агевзию и фарингодинию, которые могут прогрессировать в острый респираторный дистресс-синдром и полиорганную недостаточность. Кроме того, возможным клиническим сценарием является острое повреждение структур сердца, в первую очередь миокарда. Многие исследования показали, что высокий уровень тропонина связан с повышенной смертностью у пациентов с коронавирусной инфекцией. Своевременная точная диагностика этого состояния крайне важна для выживаемости пациентов, но в то же время остаётся пока сложной задачей.

Целью данного обзора было критическое обобщение современных данных о миокардите, связанном с COVID-19, а также изучение основных аспектов его патогенеза и дифференциальной диагностики.

Сбор статей для написания рукописи осуществлялся в базе данных научных статей PubMed. Условиями поиска были сочетания выражений «COVID-19/SARS-CoV-2 and myocardit*», присутствующие в заголовках статей (что отражалось добавлением [ti]). Отбирались только полнотекстовые статьи: метаанализы, систематические обзоры и обзоры (данные условия были заданы соответствующими фильтрами). Отбор литературы для части обзора, посвящённой миокардиту, развившемуся после вакцинации, осуществлялся путём добавления к вышеуказанным выражениям «and vaccin*», остальные параметры поиска были аналогичны вышеизложенным.

В результате сбора данных в исходную выборку для написания литературного обзора вошли 126 статей, из них 67 включали в себя обсуждение вопросов вакцинации от коронавирусной инфекции.

ПОРАЖЕНИЕ СЕРДЦА ПРИ COVID-19

Коронавирусная инфекция (COVID-19) — это заболевание, вызываемое вирусом SARS-CoV-2, который впервые был обнаружен в китайском городе Ухане в конце 2019 года и стремительно распространился по всему миру, вызвав пандемию.

Симптомы заболевания разнообразны и могут включать лихорадку, кашель, одышку, аносмию, агевзию, фарингодинию. Наиболее тяжёлыми осложнениями являются острый респираторный дистресс-синдром и полиорганное поражение. Среди клинических проявлений выделяют также острое повреждение структур сердца, чаще всего миокарда. Имеются сведения, что примерно у 20% госпитализированных пациентов выявляется повышенный

уровень специфических тропонинов [1], который, впрочем, не всегда коррелирует с наличием других признаков поражения миокарда. В другой работе при исследовании уровня тропонина I в течение первых суток после госпитализации пациентов с COVID-19 повышенный уровень был выявлен в 36% случаев. Отмечается, что даже небольшой объём поражения миокарда ассоциируется с существенным повышением смертности [2], тем не менее многие аспекты поражения миокарда при COVID-19 пока остаются невыясненными.

Патогенез и клинические проявления

Детальное понимание патогенеза поражения сердца является принципиально важным вопросом, ведь это позволит своевременно начать лечение и предотвратить тяжёлые последствия, в том числе летальный исход.

На сегодняшний день версия о том, что SARS-CoV-2 проникает в кардиомиоциты и вызывает их прямое повреждение, находит всё меньше подтверждений. У пациентов с COVID-19 нередко отмечается ассоциированный лимфоцитарный миокардит, однако его генез связывают с генерализованной воспалительной реакцией, опосредованной цитокинами. В ходе нескольких исследований [3–5] при проведении биопсии миокарда отмечено наличие лимфоцитарной инфильтрации, интерстициального отёка, ограниченных очагов некроза, однако внутриклеточного вирусного материала обнаружено не было. D. Lindner и соавт. [3] в ходе исследования материалов вскрытия пациентов с COVID-19 без клинической картины молниеносного миокардита описали наличие возбудителя COVID-19 в миокарде, но его преимущественной локализацией были не кардиомиоциты, а интерстициальные клетки и макрофаги, проникшие в ткань миокарда; наличие вируса не было ассоциировано с усиленной мононуклеарной инфильтрацией миокарда, гистологических признаков миокардита не выявлялось (не зарегистрировано массивных клеточных инфильтратов или участков некроза) [6]. Похожие данные были описаны и другими авторами [7, 8]. По данным исследования S.E. Fox и соавт. [9], при 10 вскрытиях умерших от COVID-19 афроамериканцев в миокарде был обнаружен некроз отдельных клеток (без больших участков некроза кардиомиоцитов) без явного лимфоцитарного миокардита. Это позволило предположить, что присутствие вирусных частиц в макрофагах сердца является результатом вирусемической фазы или миграции инфильтрированных альвеолярных макрофагов во внелёгочные ткани. Отмечается также, что в генезе воспалительного поражения миокарда, обнаруживаемого при вскрытии пациентов с COVID-19, нельзя не учитывать потенциальную кардиотоксичность медикаментозного лечения [10].

Другим потенциальным механизмом поражения сердца является прямое проникновение вируса в эндотелиальные клетки сердца. Как известно, эндотелий является пара-, ауто- или эндокринной тканью, повреждение

которой обуславливает микроваскулярную дисфункцию и смещение сосудистого гомеостаза в сторону вазоконстрикции, что приводит к ишемии органов и тканей, воспалению и отёку, тромбообразованию. SARS-CoV-2 проникает в эндотелиальные клетки посредством рецепторов ангиотензинпревращающего фермента 2-го типа (АПФ2) и вызывает активное воспаление. Некоторые авторы описывают диффузный васкулит, непосредственной причиной которого признаётся SARS-CoV-2: существует гипотеза, что эндотелиит может вызывать характерные для COVID-19 мультиорганные нарушения вследствие микрососудистой дисфункции [11], тем не менее эти данные пока немногочисленны и нуждаются в дальнейшем подтверждении.

Другая идея заключается в том, что повреждение сердца может быть вызвано гиперактивацией иммунной системы с высвобождением множества медиаторов воспаления. Для описания этого состояния нередко используется термин «цитокиновый шторм». Вследствие активации тромбоцитов, нейтрофилов и других компонентов воспалительного ответа развивается тромбоз в сосудах микро- и макроциркуляторного русла, что приводит к закупорке сосудов и гибели клеток. Примечательно, что тромбозы при COVID-19 распространены как в артериальном, так и венозном русле [12]. В обсервационном исследовании у пациентов с COVID-19 и инфарктом миокарда с подъёмом сегмента *ST* были зарегистрированы более высокие уровни тропонинов, а также большее число тромбозов, чем у пациентов с COVID-19 без инфаркта [13]. Случаи острого коронарного синдрома без признаков окклюзии коронарных артерий также достаточно распространены. Так, в работе S. Bangalore и соавт. [14] показано, что из 18 пациентов с COVID-19 и подъёмом сегмента *ST* на электрокардиограмме только 44% выставлен диагноз острого коронарного тромбоза, вызвавшего инфаркт миокарда; в 56% случаев обнаружено некоронарогенное поражение миокарда. В этих условиях нередко диагностические дилеммы, особенно с учётом неспецифичной симптоматики миокардита, включающей такие проявления, как усталость, одышка, тахикардия, дискомфорт в груди.

Среди воспалительных поражений миокарда при коронавирусной инфекции стоит особо отметить фульминантный миокардит, при котором происходит стремительное снижение сократительной функции левого желудочка, как правило, на фоне двустороннего поражения лёгких; возможен также перикардальный выпот вплоть до развития тампонады сердца. Примерно у 1/3 пациентов развивается кардиогенный шок, а уровень смертности составляет порядка 26%. Единичные случаи фульминантного миокардита отмечаются после вакцинации от коронавирусной инфекции, однако заболевание характеризуется менее тяжёлым течением. Исследования показали, что вероятность развития фульминантного миокардита определяется не фактом инфицирования коронавирусом

или вакцинации, а в основном наличием предрасположенности [15].

Одним из наиболее опасных клинических проявлений поражения сердца является нарушение ритма. Фактическая распространённость этого состояния остаётся неизвестной, однако имеются данные, что аритмия становится причиной перевода пациента в отделение интенсивной терапии в 44,4% случаев [16]. Затруднительно оценить, в каком проценте случаев аритмия при COVID-19 является следствием дисбаланса электролитов или проявлением ранее существовавших нарушений ритма; также аритмия может возникать в контексте миокардита [17]. По данным G. Peretto и соавт. [18], у 78,7% пациентов с подтверждённым миокардитом отмечалась та или иная форма желудочковых нарушений ритма. Имеются основания полагать, что патофизиология нарушения ритма зависит в том числе от стадии повреждения миокарда, так как характеристика аритмии при остром и излеченном миокардите различается.

Возможными механизмами нарушения ритма при COVID-19 являются прямое повреждение кардиомиоцитов с нарушением целостности плазматической мембраны и электрической проводимости; инфицирование перикарда и массивный отёк; ишемия вследствие микрососудистой патологии из-за инфицирования перицитов; аритмии вследствие фиброза миокарда; действие провоспалительных цитокинов [19, 20]. Последний механизм базируется на вытеснении десмосомного белка плакоглобина из мембраны кардиомиоцитов воспалительными цитокинами, в частности интерлейкином 6 (IL-6) [21]. Это может вызывать нарушения ритма, поскольку считается, что недостаточная адгезия между клетками повреждает мембрану и приводит к гибели клеток и последующему фиброзу. Снижение поверхностной экспрессии десмосомных белков признаётся одним из главных механизмов аритмогенных кардиомиопатий [22]. Имеются данные, что у пациентов с COVID-19 увеличена концентрация IL-6 в сыворотке крови [23]; отмечена корреляция уровня IL-6 с тяжестью состояния пациента. Таким образом, вполне вероятно, что именно COVID-19 вызывает нарушения ритма у пациентов, особенно при наличии у них генетической предрасположенности. Стоит подчеркнуть, что первые три сценария могут развиваться в условиях активного миокардита, в то время как последние два могут возникать при хроническом или излеченном миокардите.

Немаловажно, что коронавирусная инфекция предрасполагает к развитию миокардита в когорте профессиональных спортсменов, что было доказано исследованиями. Миокардит, в свою очередь, играет важную роль в патогенезе внезапной сердечной смерти у спортсменов. Физические нагрузки могут являться триггером для жизненно опасных нарушений ритма сердца и оказывают влияние на иммунную функцию: нагрузка умеренной интенсивности может улучшать иммунный ответ, в то время как интенсивная нагрузка, наоборот, резко его снижает

[24]. Внезапная смерть при остром миокардите обусловлена состоянием мышечной оболочки сердца: поражённый миокард представляет собой субстрат, предрасполагающий к развитию желудочковых аритмий; при хроническом миокардите фиброз миокарда способствует возникновению желудочковых нарушений ритма за счёт создания участков re-entry в прилежащих областях. Именно поэтому современные руководства предусматривают ограничение физических нагрузок на период от 3 до 6 месяцев после постановки диагноза миокардита [25].

Описаны случаи инфаркта миокарда после коронавирусной инфекции. Предполагается несколько возможных механизмов развития данного осложнения, в частности связывание гликопротеинов вирусной оболочки с порфирином и бета-цепью гемоглобина, что приводит к гипоксии, которая, в свою очередь, становится причиной инфаркта миокарда 2-го типа вследствие дисбаланса между потребностью миокарда в кислороде и его доставкой. Предполагается также вклад в патогенез инфаркта миокарда протромботического состояния, ассоциированного с коронавирусной инфекцией, что может способствовать развитию инфаркта миокарда 1-го типа, связанного с нестабильностью атеросклеротической бляшки [26]. Тем не менее имеются сведения, что больные коронавирусной инфекцией в сравнении с пациентами, госпитализированными с тяжёлой пневмонией другой этиологии, имеют сравнительно больший уровень тромбофилии, что указывает на возможный вклад других механизмов [27].

Результатом поражения сердца вследствие коронавирусной инфекции нередко становится развитие сердечной недостаточности. Среди возможных причин выделяют прямое повреждение миокарда вирусом, воспалительное

поражение, дисбаланс между потребностью в кислороде и его доставкой, усиление атеротромбоза вследствие дестабилизации бляшек. Наличие предшествующего заболевания сердца у таких пациентов является предиктором более тяжёлых клинических проявлений и более высокой смертности [28].

Среди более редких кардиальных проявлений коронавирусной инфекции описаны случаи синдрома такоцубо: повышение тропонина, NT-proBNP (мозговой натрийуретический гормон), инверсия волны T и элевация сегмента ST на электрокардиограмме, а также признаки баллонирования средних и апикальных сегментов миокарда по данным визуализирующих методик. Важно отметить, что триггером кардиомиопатии такоцубо обычно является психоэмоциональный стресс, приводящий к выбросу катехоламинов, что нередко встречается в условиях пандемии [17].

Основные механизмы поражения структур сердца и вызываемые ими клинические проявления суммированы в схеме (рис. 1).

Диагностика миокардита, в том числе ассоциированного с COVID-19

Диагностика миокардита в клинической практике зачастую представляет собой сложную задачу. В 2013 году Рабочей группой Европейского общества кардиологов по заболеваниям миокарда и перикарда (European Society of Cardiology, ESC) были определены предположительные и окончательные критерии диагностики миокардита. Подозрение на миокардит определяется клинической картиной (боль в области сердца), данными электрокардиограммы (элевация сегмента ST),

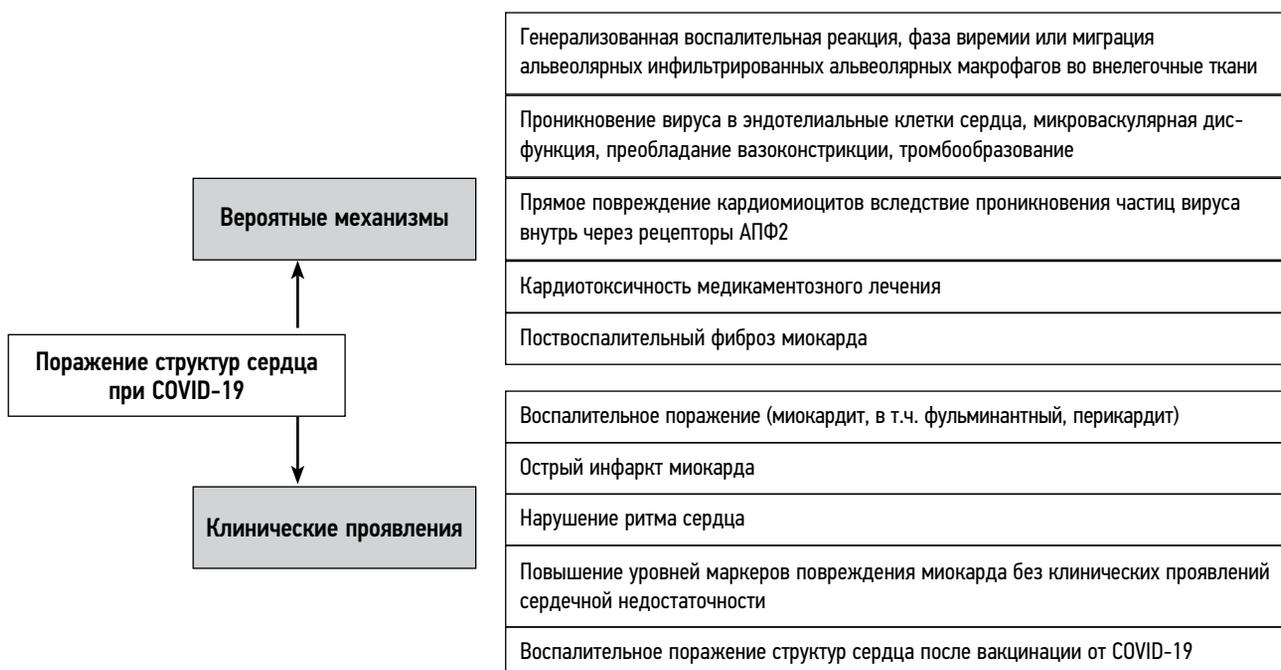


Рис. 1. Основные механизмы поражения коронавирусом структур сердца и вызываемые ими клинические проявления.

лабораторными данными (например, повышением уровня тропонинов), а также визуализирующими методами — эхокардиографией и магнитно-резонансной томографией (МРТ) [29]. Эффективность последней подчёркивается и в российских клинических рекомендациях по диагностике миокардита [30].

МРТ является ценным диагностическим методом диагностики миокардита в соответствии с критериями Lake-Louise, первоначально опубликованными в 2009 году и включавшими на тот момент оценку таких признаков, как гиперинтенсивность сигнала на T2-взвешенных изображениях (T2-ВИ) и последовательности «инверсия–восстановление с коротким T1», отсроченное накопление контрастного препарата по некоронарогенному типу [31]. Ввиду того, что эффективность использования первоначальных критериев Lake-Louise была ограничена субъективностью качественной оценки вышеуказанных признаков, в 2018 году критерии были пересмотрены и дополнены параметрическим картированием, которое позволяет дать количественную оценку региональному и глобальному времени релаксации T1 и T2 миокарда, а также объёму внеклеточного пространства (extracellular volume, ECV). Критерии Lake-Louise 2018 года имеют более высокие показатели чувствительности и специфичности (88 и 96% соответственно) [32]. Подтверждение воспалительного поражения структур сердца по данным МРТ возможно при наличии хотя бы одного критерия в каждой из следующих двух категорий: признаки отёка миокарда на основании T2-ВИ (гиперинтенсивность миокарда на T2-ВИ или высокие значения показателя T2) [33] и признаки повреждения миокарда на основании T1-ВИ (неишемический паттерн отсроченного контрастирования или высокие значения показателя T1 и/или ECV) [34]. При наличии только одного маркера диагноз воспалительного поражения миокарда всё ещё рассматривается при наличии соответствующих клинических и/или лабораторных проявлений, однако специфичность метода МРТ в этом случае ниже. Дополнительными (но не обязательными) признаками являются систолическая дисфункция (в виде наличия участков гипо- или акинезии) и признаки перикардита (в виде контрастирования листков перикарда). Важно помнить, что применение данных критериев оправдано лишь в случае клинического подозрения на воспалительное поражение сердца, но не в качестве методики скрининга бессимптомной популяции. Кроме того, МРТ позволяет выявить важные факторы, сопутствующие миокардиту, например признаки кардиомиопатий, что в совокупности может ухудшать прогноз для пациентов [35].

Важным аспектом диагностики является в том числе необходимость исключения поражения коронарных артерий, особенно в случаях, когда клиническая картина не включает ишемическую болезнь сердца [36]. Тем не менее даже исключение поражения коронарных артерий не позволяет однозначно утверждать, что клинические симптомы вызваны миокардитом; помимо этого, существует

множество типов некоронарогенного повреждения миокарда. Зачастую состояние пациента требует проведения эндомикардиальной биопсии, которая позволяет также определить этиологический фактор поражения. Несмотря на это, биопсия редко проводится у пациентов без сердечной недостаточности и/или угрожающих нарушений сердечного ритма, поскольку является инвазивной процедурой, выполнение которой сопряжено с рядом сложностей. Согласно действующим клиническим рекомендациям Американской ассоциации сердца (American Heart Association, АНА), выполнение биопсии требуется пациентам с дебютом сердечной недостаточности при наличии гемодинамической нестабильности, чтобы исключить наличие гигантоклеточной или эозинофильной инфильтрации, для которой существует специфическая терапия; при отсутствии лечения прогноз, как правило, неблагоприятный [37].

Гистологические данные биопсии и аутопсии сердца на предмет миокардита были структурированы в критериях Далласа (Dallas, 1985) и определены как гистологические доказательства наличия воспалительных инфильтратов в миокарде, связанных с дегенерацией или некрозом кардиомиоцитов неишемического генеза [38]. При наличии лимфоцитарного инфильтрата и отсутствии некроза миокардит определяется как пограничный. Однако в случае вирусного миокардита критерии Далласа работают далеко не всегда: показано, что в среднем в 50% таких случаев при доказанном наличии патогена критерии миокардита отсутствуют [39]. Недавно к критериям Далласа были добавлены иммуногистохимические признаки, которые позволяют учитывать наличие аномального воспалительного инфильтрата [36]. Наряду с ними должны присутствовать признаки дегенерации и некроза миоцитов неишемического генеза.

Появление воспалительного инфильтрата при отсутствии некроза кардиомиоцитов возможно и в нормальном миокарде [40]. Миокардит определяется главным образом характером воспалительного инфильтрата (скопление воспалительных клеток вокруг миоцитов с преобладанием лимфоцитов над макрофагами) и наличием некроза миокарда. С учётом последних литературных данных имеет смысл разделять миокардит на инфекционный (с наличием лабораторно подтверждённого возбудителя) и неинфекционный (при отсутствии такового). Ввиду наличия такого явления, как неинфекционный миокардит, вопрос о том, стоит ли использовать биопсию миокарда для диагностики миокардита, был поставлен под сомнение. В настоящее время для диагностики миокардита, в том числе ассоциированного с COVID-19, этот метод диагностики не используется; диагноз ставится на основании косвенных признаков, таких как аномалии на эхокардиографии или МРТ [41].

В целом критерии диагностики миокардита при COVID-19 остаются неизменными, однако путь к этому диагнозу может отличаться от случаев миокардита другой этиологии

(прежде всего это обусловлено необходимостью защиты медицинских работников от заражения).

На диагноз миокардита, ассоциированного с COVID-19, могут указывать некоторые лабораторные показатели: часто выявляется лимфоцитопения (до 83% случаев), при более агрессивных формах повышается значение маркеров воспаления (D-димера, ферритина, С-реактивного белка) [42]. Повышение уровня тропонина говорит о возможном повреждении миокарда и может указывать на острый миокардит. Высокие концентрации тропонина в сочетании с повышением уровня маркеров воспаления свидетельствуют о гипервоспалительном состоянии и полиорганной недостаточности [43]. Кроме того, о гемодинамической перегрузке может говорить повышение уровня NT-proBNP [44].

Электрокардиографические маркеры повреждения миокарда не являются патогномичными для миокардита: описаны различные паттерны — от синусовой тахикардии до подъёма сегмента ST и инверсии T-волны [44].

Как у стабильных, так и нестабильных пациентов при наличии клинических подозрений на миокардит визуализирующим методом первой линии является эхокардиография, тем не менее метод имеет свои ограничения для диагностики миокардита: так, желудочковая дисфункция может быть обусловлена рядом других состояний ишемической и неишемической этиологии и не является патогномичным признаком миокардита; нормальная фракция левого желудочка также не исключает наличие миокардита [45].

В общем случае повреждение сердца определяется повышением уровня сердечных тропонинов: согласно литературным данным, у пациентов с COVID-19 это происходит в 18–28% случаев [28]. Как уже было отмечено, обнаружить миокардит у пациентов с COVID-19 удаётся нечасто: так, в крупном обзоре 277 отчётов (22 исследования) о вскрытии миокарда пациентов, умерших от COVID-19, говорится лишь о ~7,8% таких случаев. Тем не менее известно о других гистопатологиях, ассоциированных с данным заболеванием: воспалительный инфильтрат без признаков миокардита был обнаружен в 12,6% случаев, ишемические повреждения отдельных кардиомиоцитов — в 13,7%, острый инфаркт миокарда — в 4,7% [46]. Сравнительно низкая встречаемость миокардита на аутопсии резко контрастирует с имеющимися в литературе данными о ~60% встречаемости миокардита по данным МРТ у пациентов, выживших после COVID-19. Так, в исследовании 15 пациентов с характерными симптомами, выздоровевших от COVID-19, в 58% случаев на МРТ были обнаружены признаки поражения миокарда (отёк, фиброз, нарушение функции желудочков) [47]. Ещё одно исследование с похожим дизайном показало, что МР-признаки поражения миокарда обнаруживаются у 78% реконвалесцентов, при этом в 75% случаев уровни тропонина оказались повышенными [48]. Эти исследования продемонстрировали, что даже по прошествии

времени с момента выздоровления риск развития поражения сердца с последующим нарушением функции желудочков сохраняется.

В условиях, когда МРТ сердца не всегда даёт информацию о наличии миокардита, так как разрешающая способность метода в этом отношении имеет пределы, а биопсия миокарда не рекомендована ввиду невозможности обнаружить вирус в кардиомиоцитах, учёные активно ведут работу над выявлением принципиально новых методов диагностики миокардита. Одним из них является метод обнаружения микро-РНК, продуцируемых T-хелперами 17, которые являются активными участниками повреждения миокарда в острой фазе и факторами развития миокардита и дилатационной кардиомиопатии в его исходе. Исследователи уже идентифицировали новую микроРНК в качестве маркера миокардита на мышечных моделях (использовались экспериментальный аутоиммунный и вирусный миокардит) и её человеческий гомолог: установлено, что использование данного маркера позволяет различить между собой миокардит и инфаркт миокарда. Тем не менее вопросов пока больше, чем ответов: например, не ясно, чем объяснить большую вариабельность уровня данной микроРНК и отражает ли это тяжесть состояния пациента; позволит ли она различить между собой такие состояния, как миокардит и дилатационная кардиомиопатия [49]. Дальнейшие исследования в этом направлении позволят разработать методику неинвазивной диагностики миокардита.

Стоит учитывать, что в ходе эпидемий, вызванных предыдущими вариантами коронавируса, случаев миокардита либо не было обнаружено (при SARS), либо они были единичны (при MERS) [50, 51]. Установлено, что тропизм возбудителя COVID-19 к кардиомиоцитам в среднем является невысоким ввиду ограниченной экспрессии рецепторов АПФ2 на поверхности этих клеток. Эти и другие данные показывают, что непосредственной причиной поражения миокарда при COVID-19 могут являться активация эндотелиальных клеток, цитокиновый шторм, дисбаланс электролитов и другие возможные иммунные механизмы [46]. Кроме того, нельзя не учитывать синдром такоцубо в качестве потенциальной причины повреждения миокарда при наличии электрокардиографических отклонений, положительных результатов на тропонин при нормальных коронарных артериях [52]. Дифференциальная диагностика должна проводиться также между миокардитом и такими состояниями, как кардиомиопатия, ассоциированная с сепсисом, и острый коронарный синдром (особенно при фульминантном течении миокардита).

Миокардит вследствие вакцинации от COVID-19

Поскольку на данный момент этиотропной терапии COVID-19 не существует, вакцинация остаётся главным способом борьбы с пандемией; эффективные вакцины

существенно снижают уровень смертности. На сегодняшний день наиболее признанными в мире являются следующие вакцины: AstraZeneca/Oxford, Johnson and Johnson, Moderna, Pfizer/BioNTech, Sinopharm, Sinovac, Спутник V. Разработано несколько принципов создания вакцин, среди которых препараты на основе РНК и ДНК (подход с использованием генетически модифицированной РНК или ДНК для создания белка, который вызывает иммунный ответ), а также на основе векторов (использование безопасного вируса, который не может вызвать заболевание, но служит платформой для производства белков коронавируса, вызывающих иммунный ответ); инактивированные вакцины (использование ослабленного вируса для развития иммунного ответа); вакцины на основе белка (использование безопасных белков или их фрагментов, которые имитируют под возбудитель COVID-19 для создания иммунного ответа). ДНК, доставляемая посредством нереплицируемой рекомбинантной аденовирусной векторной системы, является основой вакцин AstraZeneca/Oxford, Johnson and Johnson, Спутник V. В основе вакцин Moderna и Pfizer/BioNTech — технология мРНК и система доставки липидных наночастиц [53–56]. Вакцины на основе векторов, как и вакцины на основе мРНК, стимулируют производство S-белка SARS-CoV-2 — основной мишени для нейтрализующих антител, образуемых в результате естественного инфицирования или вакцинации.

В ходе программы вакцинации в литературе периодически появляются сведения о побочных эффектах вакцин. Как считается, в ряде случаев эти реакции могут привести к повышению агрегации тромбоцитов, тромбозу и воспалению. Одним из потенциальных механизмов может быть формирование клетками организма, на которые нацелено действие вакцин, свободно циркулирующих спайковых белков, которые способны взаимодействовать с рецепторами АПФ2 [57].

После вакцинации от COVID-19 (преимущественно по прошествии от 6 часов до 4 дней) были зарегистрированы случаи миокардита и перикардита [58, 59], преимущественно среди тех, кто получил вакцину на основе мРНК (Pfizer и Moderna). В Израиле были проведены два крупных ретроспективных исследования среди людей, получивших вакцину Pfizer. В ходе одного из них среди более 5,1 миллиона участников (через 21 день после первой дозы и 30 дней после второй) выявлено 136 случаев миокардита; у 95% были лёгкие симптомы, один случай закончился летальным исходом [60]. Отмечено, что наиболее часто подобные симптомы возникали у молодых мужчин. В ходе другого исследования, также проведённого в Израиле, были исследованы документы более 2,5 миллионов вакцинированных Pfizer: выявлено, что частота встречаемости миокардита составила 2,3 на 100 000 человек, при этом в группе молодых людей в возрасте от 16 до 29 лет частота составила 10 случаев на 100 000 человек [61]. Имеются также данные, что суммарный риск развития миокардита в 18,28 раз выше у тех, кто

инфицирован возбудителем COVID-19, чем у неинфицированных, т.е. значительно более высокий риск развития миокардита, чем после вакцинации (в среднем в 3,24 раза выше, чем у невакцинированных) [62]. Несмотря на то, что симптомы миокардита во всех перечисленных исследованиях появились близко ко времени вакцинации, и авторы исключили другие возможные причины (т.е. именно вакцинация была признана причиной развития миокардита), патофизиология данного явления пока до конца неясна. Существующие гипотезы, что это может возникать по причине неспецифической воспалительной реакции или перекрёстной реактивности антител вследствие молекулярной мимикрии, соотносятся с тем, что состояние пациентов улучшается на фоне противовоспалительной терапии [58].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

COVID-19 обуславливает высокий уровень смертности, в том числе при наличии сопутствующего поражения сердца, однако его механизмы пока недостаточно ясны. Главной причиной считается ассоциированный с SARS-CoV-2 миокардит, однако, по данным литературы, воспалительное поражение миокарда редко встречается при гистологических исследованиях у пациентов с подтверждённой коронавирусной инфекцией. Сам вирус обнаруживается в тканях сердца нечасто и локализуется не в кардиомиоцитах, а в иммунных клетках; в основном обнаруживается неспецифическая воспалительная инфильтрация миокарда. Учитывая эти факты, эндомиокардиальная биопсия представляется методом, который не следует широко применять для диагностики миокардита при COVID-19.

Воспалительное поражение миокарда возможно также вследствие вакцинации, преимущественно вакцинами на основании мРНК; более часто такое осложнение регистрируется у молодых людей, и в большинстве случаев отмечаются лёгкие симптомы. Подобная частота миокардита вследствие вакцинации не является рациональным поводом отказа от неё, в том числе в группе молодых людей.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении поисково-аналитической 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 поисково-аналитической работы и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Наибольший вклад распределён следующим образом: Д.А. Филатова — сбор и обработка материалов, написание текста рукописи; Е.А. Мершина — концепция и дизайн работы; В.Е. Синицын — концепция и дизайн работы, утверждение финального текста рукописи.

ADDITIONAL INFORMATION

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Shi S., Qin M., Shen B., et al. Association of cardiac injury with mortality in hospitalized patients with COVID-19 in Wuhan, China // *JAMA Cardiol.* 2020. Vol. 5, N 7. P. 802–810. doi: 10.1001/jamacardio.2020.0950
- Lala A., Johnson K.W., Januzzi J.L., et al. Prevalence and impact of myocardial injury in patients hospitalized with COVID-19 infection // *J Am Coll Cardiol.* 2020. Vol. 76, N 5. P. 533–546. doi: 10.1016/j.jacc.2020.06.007
- Lindner D., Fitzek A., Bräuninger H., et al. Association of cardiac infection with SARS-CoV-2 in confirmed COVID-19 autopsy cases // *JAMA Cardiol.* 2020. Vol. 5, N 11. P. 1–5. doi: 10.1001/jamacardio.2020.3551
- Sala S., Peretto G., Gramegna M., et al. Acute myocarditis presenting as a reverse Tako-Tsubo syndrome in a patient with SARS-CoV-2 respiratory infection // *Eur Heart J.* 2020. Vol. 41, N 19. P. 1861–1862. doi: 10.1093/eurheartj/ehaa286
- Escher F., Pietsch G., Aleshcheva G., et al. Detection of viral SARS-CoV-2 genomes and histopathological changes in endomyocardial biopsies // *ESC Heart Fail.* 2020. Vol. 7, N 5. P. 2440–2447. doi: 10.1002/ehf2.12805
- Tavazzi G., Pellegrini C., Maurelli M., et al. Myocardial localization of coronavirus in COVID-19 cardiogenic shock // *Eur J Heart Fail.* 2020. Vol. 22, N 5. P. 911–915. doi: 10.1002/ejhf.1828
- Wichmann D. Autopsy findings and venous thromboembolism in patients with COVID-19 // *Ann Intern Med.* 2020. Vol. 173, N 12. P. 1030. doi: 10.7326/L20-1206
- Buja L.M., Wolf D.A., Zhao B., et al. The emerging spectrum of cardiopulmonary pathology of the coronavirus disease 2019 (COVID-19): Report of 3 autopsies from Houston, Texas, and review of autopsy findings from other United States cities // *Cardiovasc Pathol.* 2020. N 48. P. 107233. doi: 10.1016/j.carpath.2020.107233
- Fox S.E., Akmatbekov A., Harbert J.L., et al. Pulmonary and cardiac pathology in African American patients with COVID-19: An autopsy series from New Orleans // *Lancet Respir Med.* 2020. Vol. 8, N 7. P. 681–686. doi: 10.1016/S2213-2600(20)30243-5
- Alijotas-Reig J., Esteve-Valverde E., Belizna C., et al. Immunomodulatory therapy for the management of severe COVID-19. Beyond the anti-viral therapy: A comprehensive review // *Autoimmun Rev.* 2020. Vol. 19, N 7. P. 102569. doi: 10.1016/j.autrev.2020.102569
- Varga Z., Flammer A.J., Steiger P., et al. Endothelial cell infection and endotheliitis in COVID-19 // *Lancet Lond Engl.* 2020. Vol. 395, N 10234. P. 1417–1418. doi: 10.1016/S0140-6736(20)30937-5
- Bikdeli B., Madhavan M.V., Jimenez D., et al. COVID-19 and thrombotic or thromboembolic disease: Implications for prevention, antithrombotic therapy, and follow-up: JACC state-of-the-art review // *J Am Coll Cardiol.* 2020. Vol. 75, N 23. P. 2950–2973. doi: 10.1016/j.jacc.2020.04.031
- Choudry F.A., Hamshere S.M., Rathod K.S., et al. High thrombus burden in patients with COVID-19 presenting with ST-segment elevation myocardial infarction // *J Am Coll Cardiol.* 2020. Vol. 76, N 10. P. 1168–1176. doi: 10.1016/j.jacc.2020.07.022
- Bangalore S., Sharma D., Slotwiner A., et al. ST-Segment elevation in patients with Covid-19: A case series // *N Engl J Med.* 2020. Vol. 382, N 25. P. 2478–2480. doi: 10.1056/NEJMc2009020
- Guglin M.E., Etuk A., Shah C., et al. Fulminant myocarditis and cardiogenic shock following COVID-19 infection versus COVID-19 vaccination: A systematic literature review // *J Clin Med.* 2023. Vol. 12, N 5. P. 1849. doi: 10.3390/jcm12051849
- Wang D., Hu B., Hu C., et al. Clinical characteristics of 138 hospitalized patients with 2019 novel coronavirus-infected pneumonia in Wuhan, China // *JAMA.* 2020. Vol. 323, N 11. P. 1061–1069. doi: 10.1001/jama.2020.1585
- Siripanthong B., Nazarian S., Muser D., et al. Recognizing COVID-19-related myocarditis: The possible pathophysiology and proposed guideline for diagnosis and management // *Heart Rhythm.* 2020. Vol. 17, N 9. P. 1463–1471. doi: 10.1016/j.hrthm.2020.05.001
- Peretto G., Sala S., Rizzo S., et al. Ventricular arrhythmias in myocarditis: Characterization and relationships with myocardial inflammation // *J Am Coll Cardiol.* 2020. Vol. 75, N 9. P. 1046–1057. doi: 10.1016/j.jacc.2020.01.036
- Peretto G., Sala S., Rizzo S., et al. Arrhythmias in myocarditis: State of the art // *Heart Rhythm.* 2019. Vol. 16, N 5. P. 793–801. doi: 10.1016/j.hrthm.2018.11.024
- Chen L., Li X., Chen M., et al. The ACE2 expression in human heart indicates new potential mechanism of heart injury among patients infected with SARS-CoV-2 // *Cardiovasc Res.* 2020. Vol. 116, N 6. P. 1097–1100P. doi: 10.1093/cvr/cvaa078
- Asimaki A., Tandri H., Duffi E.R., et al. Altered desmosomal proteins in granulomatous myocarditis and potential pathogenic links to arrhythmogenic right ventricular cardiomyopathy // *Circ Arrhythm Electrophysiol.* 2011. Vol. 4, N 5. P. 743–752. doi: 10.1161/CIRCEP.111.964890
- Gemayel C., Pelliccia A., Thompson P.D. Arrhythmogenic right ventricular cardiomyopathy // *J Am Coll Cardiol.* 2001. Vol. 38, N 7. P. 1773–1781. doi: 10.1016/s0735-1097(01)01654-0
- Coomes E.A., Haghbayan H. Interleukin-6 in Covid-19: A systematic review and meta-analysis // *Rev Med Virol.* 2020. Vol. 30, N 6. P. 1–9. doi: 10.1002/rmv.2141
- Modica G., Bianco M., Sollazzo F., et al. Myocarditis in athletes recovering from COVID-19: A systematic review and meta-analysis // *Int J Environ Res Public Health.* 2022. Vol. 19, N 7. P. 4279. doi: 10.3390/ijerph19074279

25. Eichhorn C., Biere L., Schnell F., et al. Myocarditis in athletes is a challenge: Diagnosis, risk stratification, and uncertainties // *JACC Cardiovasc Imaging*. 2020. Vol. 13, N 2, Pt. 1. P. 494–507. doi: 10.1016/j.jcmg.2019.01.039
26. Azevedo R.B., Botelho B.G., de Hollanda G., et al. Covid-19 and the cardiovascular system: A comprehensive review: 1 // *J Hum Hypertens*. 2021. Vol. 35, N 1. P. 4–11. doi: 10.1038/s41371-020-0387-4
27. Klok F.A., Kruij M.J., van der Meer H.J., et al. Incidence of thrombotic complications in critically ill ICU patients with COVID-19 // *Thromb Res*. 2020. N 191. P. 145–147. doi: 10.1016/j.thromres.2020.04.013
28. Guo T., Fan Y., Chen M., et al. Cardiovascular Implications of fatal outcomes of patients with coronavirus disease 2019 (COVID-19) // *JAMA Cardiol*. 2020. Vol. 5, N 7. P. 811–818. doi: 10.1001/jamacardio.2020.1017
29. Ларина О.М. Магнитно-резонансная томография сердца в диагностике острого миокардита: клинический случай и обзор литературы // *Вестник рентгенологии и радиологии*. 2014. № 5. С. 54–59.
30. Арутюнов Г.Б., Палеев Ф.Н., Моисеева О.М. Миокардиты у взрослых. Клинические рекомендации 2020 // *Российский кардиологический журнал*. 2021. Т. 26, № 11. С. 47–90. doi: 10.15829/1560-4071-2021-4790
31. Friedrich M.G., Sechtem U., Schulz-Menger J., et al. Cardiovascular magnetic resonance in myocarditis: A JACC white paper // *J Am Coll Cardiol*. 2009. Vol. 53, N 17. P. 1475–1487. doi: 10.1016/j.jacc.2009.02.007
32. Tijmes S.F., Thavendiranathan P., Udell J.A., et al. Cardiac MRI assessment of nonischemic myocardial inflammation: State of the art review and update on myocarditis associated with COVID-19 vaccination // *Radiol Cardiothorac Imaging*. 2021. Vol. 3, N 6. P. e210252. doi: 10.1148/ryct.210252
33. Srichai M.B., Lim R.P., Lath N., et al. Diagnostic performance of dark-blood T2-weighted CMR for evaluation of acute myocardial injury // *Invest Radiol*. 2013. Vol. 48, N 1. P. 24–31. doi: 10.1097/RLI.0b013e3182718672
34. Galán-Arriola C., Lobo M., Vilchez-Tschischke J.P., et al. Serial magnetic resonance imaging to identify early stages of anthracycline-induced cardiotoxicity // *J Am Coll Cardiol*. 2019. Vol. 73, N 7. P. 779–791. doi: 10.1016/j.jacc.2018.11.046
35. Благова О.В., Павленко Е.В., Вариончик Н.В., и др. Миокардит как закономерный феномен у больных с первичным некомпактным миокардом: диагностика, лечение и влияние на исходы // *Российский кардиологический журнал*. 2018. N 2. С. 44–52. doi: 10.15829/1560-4071-2018-2-44-52
36. Caforio A.L., Pankuweit S., Arbustini E., et al. Current state of knowledge on aetiology, diagnosis, management, and therapy of myocarditis: A position statement of the European Society of Cardiology Working Group on Myocardial and Pericardial Diseases // *Eur Heart J*. 2013. Vol. 34, N 33. P. 2636–2648, 2648a–2648d. doi: 10.1093/eurheartj/ehz210
37. Cooper L.T., Baughman K.L., Feldman A.M., et al. The role of endomyocardial biopsy in the management of cardiovascular disease: A scientific statement from the American Heart Association, the American College of Cardiology, and the European Society of Cardiology // *Circulation*. 2007. Vol. 116, N 19. P. 2216–2233. doi: 10.1161/CIRCULATIONAHA.107.186093
38. Aretz H.T. Myocarditis: The Dallas criteria // *Hum Pathol*. 1987. Vol. 18, N 6. P. 619–624. doi: 10.1016/s0046-8177(87)80363-5
39. Dennert R., Crijns H.J., Heymans S. Acute viral myocarditis // *Eur Heart J*. 2008. Vol. 29, N 17. P. 2073–2082. doi: 10.1093/eurheartj/ehn296
40. Zhang M., Tavora F., Zhang Y., et al. The role of focal myocardial inflammation in sudden unexpected cardiac and noncardiac deaths: A clinicopathological study // *Int J Legal Med*. 2013. Vol. 127, N 1. P. 131–138. doi: 10.1007/s00414-011-0634-x
41. Титов В.А., Игнатъева В.С., Митрофанова Л.Б. Сравнительное исследование информативности неинвазивных методов диагностики воспалительных заболеваний миокарда // *Российский кардиологический журнал*. 2018. Т. 23, N 2. С. 53–59.
42. Zhou F., Yu T., Fan R., et al. Clinical course and risk factors for mortality of adult inpatients with COVID-19 in Wuhan, China: A retrospective cohort study // *Lancet Lond Engl*. 2020. Vol. 395, N 10229. P. 10541062. doi: 10.1016/S0140-6736(20)30566-3
43. Mehta P., McAuley D.F., Brown M., et al. COVID-19: Consider cytokine storm syndromes and immunosuppression // *Lancet Lond Engl*. 2020. Vol. 395, N 10229. P. 1033–1034. doi: 10.1016/S0140-6736(20)30628-0
44. Castiello T., Georgiopoulos G., Finocchiaro G., et al. COVID-19 and myocarditis: A systematic review and overview of current challenges // *Heart Fail Rev*. 2022. Vol. 27, N 1. P. 251–261. doi: 10.1007/s10741-021-10087-9
45. Mele D., Flamigni F., Rapezzi C., et al. Myocarditis in COVID-19 patients: Current problems // *Intern Emerg Med*. 2021. Vol. 16, N 5. P. 1123–1129. doi: 10.1007/s11739-021-02635-w
46. Halushka M.K., Vander Heide R.S. Myocarditis is rare in COVID-19 autopsies: Cardiovascular findings across 277 postmortem examinations // *Cardiovasc Pathol*. 2021. N 50. P. 107300. doi: 10.1016/j.carpath.2020.107300
47. 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
48. 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
49. Blanco-Domínguez R., Sánchez-Díaz R., de la Fuente H., et al. A novel circulating MicroRNA for the detection of acute myocarditis // *N Engl J Med*. 2021. Vol. 384, N 21. P. 2014–2027. doi: 10.1056/NEJMoa2003608
50. Tan L., Wang Q., Zhang D., et al. Lymphopenia predicts disease severity of COVID-19: A descriptive and predictive study // *Signal Transduct Target Ther*. 2020. Vol. 5, N 1. P. 33. doi: 10.1038/s41392-020-0148-4
51. Xu Z., Shi L., Zhang J., et al. Pathological findings of COVID-19 associated with acute respiratory distress syndrome // *Lancet Respir Med*. 2020. Vol. 8, N 4. P. 420–422. doi: 10.1016/S2213-2600(20)30076-X
52. Kawakami R., Sakamoto A., Kawai K., et al. Pathological evidence for SARS-CoV-2 as a cause of myocarditis // *J Am Coll Cardiol*. 2021. Vol. 77, N 3. P. 314–325. doi: 10.1016/j.jacc.2020.11.031
53. Baden L.R., Sahly H.M., Essink B., et al. Efficacy and Safety of the mRNA-1273 SARS-CoV-2 Vaccine // *N Engl J Med*. 2021. Vol. 384, N 5. P. 403–416. doi: 10.1056/NEJMoa2035389
54. Logunov D.Y., Dolzhikova I.V., Shchelyakov D.V., et al. Safety and efficacy of an rAd26 and rAd5 vector-based heterologous

prime-boost COVID-19 vaccine: An interim analysis of a randomised controlled phase 3 trial in Russia // *Lancet*. 2021. Vol. 397, N 10275. P. 671–681. doi: 10.1016/S0140-6736(21)00234-8

55. Polack F.P., Thomas S.J., Kitchin N., et al. Safety and efficacy of the BNT162b2 mRNA Covid-19 vaccine // *N Engl J Med*. 2020. Vol. 383, N 27. P. 2603–2615. doi: 10.1056/NEJMoa2034577

56. Voysey M., Costa Clemens S.A., Madhi S.A., et al. Safety and efficacy of the ChAdOx1 nCoV-19 vaccine (AZD1222) against SARS-CoV-2: An interim analysis of four randomised controlled trials in Brazil, South Africa, and the UK // *Lancet*. 2021. Vol. 397, N 10269. P. 99–111. doi: 10.1016/S0140-6736(20)32661-1

57. Shiravi A.A., Ardekani A., Sheikhbahaei E., et al. Cardiovascular complications of SARS-CoV-2 vaccines: An overview // *Cardiol Ther*. 2021. Vol. 11, N 1. P. 13–21 doi: 10.1007/s40119-021-00248-0

58. Watad A., De Marco G., Mahajna H., et al. Immune-Mediated disease flares or new-onset disease in 27 subjects following mRNA/

DNA SARS-CoV-2 Vaccination: 5 // *Vaccines*. 2021. Vol. 9, N 5. P. 435. doi: 10.3390/vaccines9050435

59. Albert E., Aurigemma G., Saucedo J., et al. Myocarditis following COVID-19 vaccination // *Radiol Case Rep*. 2021. Vol. 16, N 8. P. 2142–2145. doi: 10.1016/j.radcr.2021.05.033

60. Mevorach D., Anis E., Cedar N., et al. Myocarditis after BNT162b2 mRNA Vaccine against Covid-19 in Israel // *N Engl J Med*. 2021. Vol. 385, N 23. P. 2140–2149. doi: 10.1056/NEJMoa2109730

61. Witberg G., Barda N., Hoss S., et al. Myocarditis after Covid-19 vaccination in a large health care organization // *N Engl J Med*. 2021. Vol. 385, N 23. P. 2132–2139. doi: 10.1056/NEJMoa2110737

62. Barda N., Dagan N., Ben-Shlomo Y., et al. Safety of the BNT162b2 mRNA Covid-19 vaccine in a nationwide setting // *N Engl J Med*. 2021. Vol. 385, N 12. P. 1078–1090. doi: 10.1056/NEJMoa2110475

REFERENCES

1. Shi S, Qin M, Shen B, et al. Association of cardiac injury with mortality in hospitalized patients with COVID-19 in Wuhan, China. *JAMA Cardiol*. 2020;5(7):802–810. doi: 10.1001/jamacardio.2020.0950

2. Lala A, Johnson KW, Januzzi JL, et al. Prevalence and impact of myocardial injury in patients hospitalized with COVID-19 infection. *J Am Coll Cardiol*. 2020;76(5):533–546. doi: 10.1016/j.jacc.2020.06.007

3. Lindner D, Fitzek A, Bräuninger H, et al. Association of cardiac infection with SARS-CoV-2 in confirmed COVID-19 autopsy cases. *JAMA Cardiol*. 2020;5(11):1–5. doi: 10.1001/jamacardio.2020.3551

4. Sala S, Peretto G, Gramegna M, et al. Acute myocarditis presenting as a reverse Tako-Tsubo syndrome in a patient with SARS-CoV-2 respiratory infection. *Eur Heart J*. 2020;41(19):1861–1862. doi: 10.1093/eurheartj/ehaa286

5. Escher F, Pietsch H, Aleshcheva G, et al. Detection of viral SARS-CoV-2 genomes and histopathological changes in endomyocardial biopsies. *ESC Heart Fail*. 2020;7(5):2440–2447. doi: 10.1002/ehf2.12805

6. Tavazzi G, Pellegrini C, Maurelli M, et al. Myocardial localization of coronavirus in COVID-19 cardiogenic shock. *Eur J Heart Fail*. 2020;22(5):911–915. doi: 10.1002/ejhf.1828

7. Wichmann D. Autopsy findings and venous thromboembolism in patients with COVID-19. *Ann Intern Med*. 2020;173(12):1030. doi: 10.7326/L20-1206

8. Buja LM, Wolf DA, Zhao B, et al. The emerging spectrum of cardiopulmonary pathology of the coronavirus disease 2019 (COVID-19): Report of 3 autopsies from Houston, Texas, and review of autopsy findings from other United States cities. *Cardiovasc Pathol*. 2020;(48):107233. doi: 10.1016/j.carpath.2020.107233

9. Fox SE, Akmatbekov A, Harbert JL, et al. Pulmonary and cardiac pathology in African American patients with COVID-19: An autopsy series from New Orleans. *Lancet Respir Med*. 2020;10(7):681–686. doi: 10.1016/S2213-2600(20)30243-5

10. Alijotas-Reig J, Esteve-Valverde E, Belizna C, et al. Immunomodulatory therapy for the management of severe COVID-19. Beyond the anti-viral therapy: A comprehensive review. *Autoimmun Rev*. 2020;19(7):102569. doi: 10.1016/j.autrev.2020.102569

11. Varga Z, Flammer AJ, Steiger P, et al. Endothelial cell infection and endotheliitis in COVID-19. *Lancet Lond Engl*. 2020;395(10234):1417–1418. doi: 10.1016/S0140-6736(20)30937-5

12. Bikdeli B, Madhavan MV, Jimenez D, et al. COVID-19 and thrombotic or thromboembolic disease: Implications for prevention, antithrombotic therapy, and follow-up: JACC state-of-the-art review. *J Am Coll Cardiol*. 2020;75(23):2950–2973. doi: 10.1016/j.jacc.2020.04.031

13. Choudry FA, Hamshere SM, Rathod KS, et al. High thrombus burden in patients with Covid-19 presenting with ST-segment elevation myocardial infarction. *J Am Coll Cardiol*. 2020;76(10):1168–1176. doi: 10.1016/j.jacc.2020.07.022

14. Bangalore S, Hamshere SM, Rathod KS, et al. ST-Segment elevation in patients with Covid-19: A case series. *N Engl J Med*. 2020;382(25):2478–2480. doi: 10.1056/NEJMc2009020

15. Guglin ME, Etuk A, Shah C, et al. Fulminant myocarditis and cardiogenic shock following COVID-19 infection versus COVID-19 vaccination: A systematic literature review. *J Clin Med*. 2023;12(5):1849. doi: 10.3390/jcm12051849

16. Wang D, Hu B, Hu C, et al. Clinical characteristics of 138 hospitalized patients with 2019 novel coronavirus-infected pneumonia in Wuhan, China. *JAMA*. 2020;323(11):1061–1069. doi: 10.1001/jama.2020.1585

17. Siripanthong B, Nazarian S, Muser D, et al. Recognizing COVID-19-related myocarditis: The possible pathophysiology and proposed guideline for diagnosis and management. *Heart Rhythm*. 2020;17(9):1463–1471. doi: 10.1016/j.hrthm.2020.05.001

18. Peretto G, Sala S, Rizzo S, et al. Ventricular arrhythmias in myocarditis: Characterization and relationships with myocardial inflammation. *J Am Coll Cardiol*. 2020;75(9):1046–1057. doi: 10.1016/j.jacc.2020.01.036

19. Peretto G, Sala S, Rizzo S, et al. Arrhythmias in myocarditis: State of the art. *Heart Rhythm*. 2019;16(5):793–801. doi: 10.1016/j.hrthm.2018.11.024

20. Chen L, Li X, Chen M, et al. The ACE2 expression in human heart indicates new potential mechanism of heart injury among patients infected with SARS-CoV-2. *Cardiovasc Res*. 2020;116(6):1097–1100. doi: 10.1093/cvr/cvaa078

21. Asimaki A, Tandri H, Duffy ER, et al. Altered desmosomal proteins in granulomatous myocarditis and potential pathogenic links to arrhythmogenic right ventricular cardiomyopathy. *Circ Arrhythm Electrophysiol*. 2011;4(5):743–752. doi: 10.1161/CIRCEP.111.964890

22. Gemayel C, Pelliccia A, Thompson PD. Arrhythmogenic right ventricular cardiomyopathy. *J Am Coll Cardiol*. 2001;38(7):1773–1781. doi: 10.1016/s0735-1097(01)01654-0
23. Coomes EA, Haghbayan H. Interleukin-6 in Covid-19: A systematic review and meta-analysis. *Rev Med Virol*. 2020;30(6):1–9. doi: 10.1002/rmv.2141
24. Modica G, Bianco M, Sollazzo F, et al. Myocarditis in athletes recovering from COVID-19: A systematic review and meta-analysis. *Int J Environ Res Public Health*. 2022;19(7):4279. doi: 10.3390/ijerph19074279
25. Eichhorn C, Biere L, Schnell F, et al. Myocarditis in athletes is a challenge: Diagnosis, risk stratification, and uncertainties. *JACC Cardiovasc Imaging*. 2020;13(2):494–507. doi: 10.1016/j.jcmg.2019.01.039
26. Azevedo RB, Botelho BG, de Hollanda G, et al. Covid-19 and the cardiovascular system: A comprehensive review. *J Hum Hypertens*. 2021;35(1):4–11. doi: 10.1038/s41371-020-0387-4
27. Klok FA, Kruip MJ, van der Meer HJ, et al. Incidence of thrombotic complications in critically ill ICU patients with COVID-19. *Thromb Res*. 2020;(191):145–147. doi: 10.1016/j.thromres.2020.04.013
28. Guo T, Fan Y, Chen M, et al. Cardiovascular implications of fatal outcomes of patients with coronavirus disease 2019 (COVID-19). *JAMA Cardiol*. 2020;5(7):811–818. doi: 10.1001/jamacardio.2020.1017
29. Larina OM. Cardiac magnetic resonance imaging in the diagnosis of acute myocarditis: A clinical case and review of the literature. *Bulletin Radiol Radiol*. 2014;(5):54–59. (In Russ).
30. Arutyunov GB, Paleev FN, Moiseeva OM. Myocarditis in adults. Clinical recommendations 2020. *Russ Cardiol J*. 2021;26(11):4790. (In Russ). doi: 10.15829/1560-4071-2021-4790
31. Friedrich MG, Sechtem U, Schulz-Menger J, et al. Cardiovascular magnetic resonance in myocarditis: A JACC white paper. *J Am Coll Cardiol*. 2009;53(17):1475–1487. doi: 10.1016/j.jacc.2009.02.007
32. Tijmes SF, Thavendiranathan P, Udell JA, et al. Cardiac MRI assessment of nonischemic myocardial inflammation: State of the art review and update on myocarditis associated with COVID-19. *Vaccination Radiol Cardiothorac Imaging*. 2021;3(6):e210252. doi: 10.1148/ryct.210252
33. Srichai MB, Lim RP, Lath N, et al. Diagnostic performance of dark-blood T2-weighted CMR for evaluation of acute myocardial injury. *Invest Radiol*. 2013;48(1):24–31. doi: 10.1097/RLI.0b013e3182718672
34. Galán-Arriola C, Lim RP, Lath N, et al. Serial magnetic resonance imaging to identify early stages of anthracycline-induced cardiotoxicity. *J Am Coll Cardiol*. 2019;73(7):779–791. doi: 10.1016/j.jacc.2018.11.046
35. Blagova OV, Pavlenko EV, Varionchik NV, et al. Myocarditis as a natural phenomenon in patients with primary non-compact myocardium: Diagnosis, treatment and impact on outcomes // *Russ J Cardiol*. 2018;(2):44–52. (In Russ). doi: 10.15829/1560-4071-2018-2-44-52
36. Caforio AL, Pankuweit S, Arbustini E, et al. Current state of knowledge on aetiology, diagnosis, management, and therapy of myocarditis: A position statement of the European Society of Cardiology Working Group on Myocardial and Pericardial Diseases. *Eur Heart J*. 2013;34(33):2636–2648, 2648a–2648d. doi: 10.1093/eurheartj/eh210
37. Cooper LT, Baughman KL, Feldman AM, et al. The role of endomyocardial biopsy in the management of cardiovascular disease: A scientific statement from the American Heart Association, the American College of Cardiology, and the European Society of Cardiology. *Circulation*. 2007;116(19):2216–2233. doi: 10.1161/CIRCULATIONAHA.107.186093
38. Aretz HT. Myocarditis: The Dallas criteria. *Hum Pathol*. 1987;18(6):619–624. doi: 10.1016/s0046-8177(87)80363-5
39. Dennert R, Crijns HJ, Heymans S. Acute viral myocarditis. *Eur Heart J*. 2008;29(17):2073–2082. doi: 10.1093/eurheartj/ehn296
40. Zhang M, Tavora F, Zhang Y, et al. The role of focal myocardial inflammation in sudden unexpected cardiac and noncardiac deaths: A clinicopathological study. *Int J Legal Med*. 2013;127(1):131–138. doi: 10.1007/s00414-011-0634-x
41. Titov VA, Ignatyeva VS, Mitrofanova LB. Comparative study of informativeness of noninvasive methods for diagnosis of myocardial inflammatory diseases. *Russ J Cardiol*. 2018;23(2):53–59. (In Russ).
42. Zhou F, Yu T, Du R, et al. Clinical course and risk factors for mortality of adult inpatients with COVID-19 in Wuhan, China: A retrospective cohort study. *Lancet Lond Engl*. 2020;395(10229):1054–1062. doi: 10.1016/S0140-6736(20)30566-3
43. Mehta P, McAuley DF, Brown M, et al. COVID-19: Consider cytokine storm syndromes and immunosuppression. *Lancet Lond Engl*. 2020;395(10229):1033–1034. doi: 10.1016/S0140-6736(20)30628-0
44. Castiello T, Georgiopoulos G, Finocchiaro G, et al. COVID-19 and myocarditis: A systematic review and overview of current challenges. *Heart Fail Rev*. 2022;27(1):251–261. doi: 10.1007/s10741-021-10087-9
45. Mele D, Flamigni F, Rapezzi C, et al. Myocarditis in COVID-19 patients: Current problems. *Intern Emerg Med*. 2021;16(5):1123–1129. doi: 10.1007/s11739-021-02635-w
46. Halushka MK, Vander Heide RS. Myocarditis is rare in COVID-19 autopsies: Cardiovascular findings across 277 postmortem examinations. *Cardiovasc Pathol*. 2021;(50):107300. doi: 10.1016/j.carpath.2020.107300
47. 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
48. 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
49. Blanco-Domínguez R, Sánchez-Díaz R, de la Fuente H, et al. A novel circulating MicroRNA for the detection of acute myocarditis. *N Engl J Med*. 2021;384(21):2014–2027. doi: 10.1056/NEJMoa2003608
50. Tan L, Wang Q, Zhang D, et al. Lymphopenia predicts disease severity of COVID-19: A descriptive and predictive study. *Signal Transduct Target Ther*. 2020;5(1):33. doi: 10.1038/s41392-020-0148-4
51. Xu Z, Shi L, Wang Y, et al. Pathological findings of COVID-19 associated with acute respiratory distress syndrome. *Lancet Respir Med*. 2020;8(4):420–422. doi: 10.1016/S2213-2600(20)30076-X
52. Kawakami R, Sakamoto A, Kawai K, et al. Pathological evidence for SARS-CoV-2 as a cause of myocarditis. *J Am Coll Cardiol*. 2021;77(3):314–325. doi: 10.1016/j.jacc.2020.11.031
53. Baden LR, El Sahly HM, Essink B, et al. Efficacy and safety of the mRNA-1273 SARS-CoV-2 vaccine. *N Engl J Med*. 2021;384(5):403–416. doi: 10.1056/NEJMoa2035389
54. Logunov DY, Dolzhikova IV, Shcheblyakov DV, et al. Safety and efficacy of an rAd26 and rAd5 vector-based heterologous prime-boost COVID-19 vaccine: An interim analysis of a randomised controlled phase 3 trial in Russia. *Lancet*. 2021;397(10275):671–681. doi: 10.1016/S0140-6736(21)00234-8

- 55.** Polack FP, Thomas SJ, Kitchin N, et al. Safety and efficacy of the BNT162b2 mRNA Covid-19 vaccine. *N Engl J Med.* 2020;383(27):2603–2615. doi: 10.1056/NEJMoa2034577
- 56.** Voysey M, Clemens SA, Madhi SA, et al. Safety and efficacy of the ChAdOx1 nCoV-19 vaccine (AZD1222) against SARS-CoV-2: An interim analysis of four randomised controlled trials in Brazil, South Africa, and the UK. *Lancet.* 2021;397(10269):99–111. doi: 10.1016/S0140-6736(20)32661-1
- 57.** Shiravi AA, Ardekani A, Sheikhabaei E, et al. Cardiovascular complications of SARS-CoV-2 vaccines: An overview. *Cardiol Ther.* 2021;11(1):13–21. doi: 10.1007/s40119-021-00248-0
- 58.** Watad A, De Marco G, Mahajna H, et al. Immune-Mediated disease flares or new-onset disease in 27 subjects following mRNA/DNA SARS-CoV-2 Vaccination: 5. *Vaccines.* 2021;9(5):435. doi: 10.3390/vaccines9050435
- 59.** Albert E, Aurigemma G, Saucedo J, et al. Myocarditis following COVID-19 vaccination. *Radiol Case Rep.* 2021;16(8):2142–2145. doi: 10.1016/j.radcr.2021.05.033
- 60.** Mevorach D, Anis E, Cedar N, et al. Myocarditis after BNT162b2 mRNA vaccine against Covid-19 in Israel. *N Engl J Med.* 2021;385(23):2140–2149. doi: 10.1056/NEJMoa2109730
- 61.** Witberg G, Barda N, Hoss S, et al. Myocarditis after Covid-19 vaccination in a large health care organization. *N Engl J Med.* 2021;385(23):2132–2139. doi: 10.1056/NEJMoa2110737
- 62.** Barda N, Dagan N, Ben-Shlomo Y, et al. Safety of the BNT162b2 mRNA Covid-19 vaccine in a nationwide setting. *N Engl J Med.* 2021;385(12):1078–1090. doi: 10.1056/NEJMoa2110475

ОБ АВТОРАХ

* Филатова Дарья Андреевна;

адрес: Россия, 119991, Москва, Ломоносовский пр-т, д. 27/10;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0894-1994>;
eLibrary SPIN: 2665-5973; e-mail: dariafilatova.msu@mail.ru

Мершина Елена Александровна, канд. мед. наук, доцент;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1266-4926>;
eLibrary SPIN: 6897-9641; e-mail: elena_mershina@mail.ru

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5649-2193>;
eLibrary SPIN: 8449-6590; e-mail: vsini@mail.ru

AUTHORS' INFO

* Daria A. Filatova;

address: 27/10 Lomonosovsky prospekt, 119991 Moscow, Russia;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0894-1994>;
eLibrary SPIN: 2665-5973; e-mail: dariafilatova.msu@mail.ru

Elena A. Mershina, MD, Cand. Sci. (Med), Associate Professor;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1266-4926>;
eLibrary SPIN: 6897-9641; e-mail: elena_mershina@mail.ru

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5649-2193>;
eLibrary SPIN: 8449-6590; e-mail: vsini@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD472150>

Оценка поглощённых доз в плоде у беременных при компьютерной томографии: систематический обзор

А.В. Водоватов¹, О.А. Гольченко², И.А. Машенко³, Д.В. Алексеева³,
Л.А. Чипига^{1, 3}, И.В. Хуторной⁴, П.В. Козлова³, Г.Е. Труфанов³, П.С. Дружинина¹,
С.А. Рыжов⁵, И.В. Солдатов⁵

¹ Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Санкт-Петербург, Российская Федерация

² Городская поликлиника № 19, Санкт-Петербург, Российская Федерация

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

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация

⁵ Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий, Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Отсутствие в отечественной практике утверждённых методик расчёта и систематизированных данных в отношении доз облучения плода при рентгенорадиологических исследованиях у беременных затрудняет их практическое применение. Данная проблема особенно актуальна для компьютерной томографии как широко распространённого высокоинформативного метода лучевой диагностики, ассоциированного со значительными уровнями облучения пациентов.

Цель — систематизировать существующие данные о поглощённых дозах в плоде при проведении компьютерной томографии.

Материалы и методы. Проведены поиск и анализ публикаций на русском и английском языках. Поиск осуществлялся в системах PubMed/Medline, Google Scholar и eLibrary. В окончательный анализ включено 12 публикаций, в том числе 8 исследований с использованием антропоморфных фантомов, 3 ретроспективных и 1 проспективное клиническое исследование.

Результаты. Наиболее высокие значения поглощённых доз в плоде получены при проведении компьютерных сканирований брюшной полости и малого таза, а также сканировании всего тела. Во включённых в обзор публикациях не зафиксировано превышения предельно допустимой дозы облучения плода.

Заключение. При проведении однократных однофазных компьютерных сканирований у беременных превышение допустимого порога поглощённой дозы 100 мГр в плоде маловероятно независимо от зоны сканирования, что позволяет назначать исследование при наличии клинических показаний. Однако этот порог может быть превышен при многократных или многофазных исследованиях методом компьютерной томографии брюшной полости и малого таза, а также всего тела при травме. В таких случаях мультидисциплинарной командой специалистов по радиационной безопасности (врачи-рентгенологи и клинические специалисты) должна быть проведена дополнительная оценка рисков.

Ключевые слова: беременность; радиационный риск; доза облучения органов; диагностическая визуализация; риск для плода во время беременности; облучение; компьютерная томография; поглощённые дозы в плоде.

Как цитировать

Водоватов А.В., Гольченко О.А., Машенко И.А., Алексеева Д.В., Чипига Л.А., Хуторной И.В., Козлова П.В., Труфанов Г.Е., Дружинина П.С., Рыжов С.А., Солдатов И.В. Оценка поглощённых доз в плоде у беременных при компьютерной томографии: систематический обзор // *Digital Diagnostics*. 2023. Т. 4, № 2. С. 170–184. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD472150>

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD472150>

Evaluation of fetal absorbed doses from computed tomography examinations of pregnant patients: A systematic review

Alexander V. Vodovатов¹, Olga A. Golchenko², Irina A. Mashchenko³,
Daria V. Alekseeva³, Larisa A. Chipiga^{1, 3}, Ivan V. Khutornoy⁴, Polina V. Kozlova³,
Gennady E. Trufanov³, Polina S. Druzhinina¹, Sergey A. Ryzhov⁵, Ilya V. Soldatov⁵

¹ Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Saint Petersburg, Russian Federation

² City polyclinic № 19, Saint Petersburg, Russian Federation

³ Almazov National Medical Research Centre, Saint Petersburg, Russian Federation

⁴ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

⁵ Research and Practice Center of Diagnostics and Telemedicine Technologies, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: Currently, no systematic data are available on fetal radiation exposure as a result of radiographic studies during pregnancy. Consequently, there are no approved methods of its calculation that can be used in clinical practice. It is especially relevant for computed tomography scans as it is a widely used and highly informative method of diagnostic imaging associated with high exposure levels.

AIM: to systematize currently available data on radiation dose absorbed by the fetus from computed tomography scans in pregnant women.

MATERIALS AND METHODS: The search for publications in Russian and English was conducted in PubMed/Medline, Google Scholar and eLibrary. The final analysis included 12 papers including 8 studies using human body phantoms, 3 retrospective studies and one prospective clinical study.

RESULTS: Abdominal and pelvic computed tomography scans as well as whole-body scans were found to be associated with the highest fetal radiation exposure. However, in none of the publications the fetal exposure limit was exceeded.

CONCLUSION: Clinically indicated non-contrast-enhanced computed tomography scans in pregnant women are not likely to be associated with the fetal absorbed doses that exceed the limit of 100 mGy regardless of the scanned area. However, this limit might be exceeded in case of performing multiple studies or if multiphase abdominal or pelvic computed tomography scans, or whole-body computed tomography scans are performed in patients with multiple trauma. In these cases, a decision regarding the need for these investigations should be made by a multi-disciplinary team (including radiation safety specialists, diagnostic radiologists and clinicians) based on the results of additional risk assessment.

Keywords: computed tomography scans; pregnancy; radiation risk; organ dose; diagnostic imaging; fetal absorbed dose; fetal risks pregnancy radiation.

To cite this article

Vodovатов AV, Golchenko OA, Mashchenko IA, Alekseeva DV, Chipiga LA, Khutornoy IV, Kozlova PV, Trufanov GE, Druzhinina PS, Ryzhov SA, Soldatov IV. Evaluation of fetal absorbed doses from computed tomography examinations of pregnant patients: a systematic review. *Digital Diagnostics*. 2023;4(2):170–184. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD472150>

Received: 05.06.2023

Accepted: 19.06.2023

Published: 27.06.2023

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD472150>

当对孕妇进行电子计算机断层扫描时胎儿吸收剂量的评估：系统综述

Alexander V. Vodovatov¹, Olga A. Golchenko², Irina A. Mashchenko³,
Daria V. Alekseeva³, Larisa A. Chipiga^{1,3}, Ivan V. Khutornoy⁴, Polina V. Kozlova³,
Gennady E. Trufanov³, Polina S. Druzhinina¹, Sergey A. Ryzhov⁵, Ilya V. Soldatov⁵

¹ Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Saint Petersburg, Russian Federation

² City polyclinic № 19, Saint Petersburg, Russian Federation

³ Almazov National Medical Research Centre, Saint Petersburg, Russian Federation

⁴ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

⁵ Research and Practice Center of Diagnostics and Telemedicine Technologies, Moscow, Russian Federation

简评

论证。 由于在国内实践中缺乏经批准的计算方法和关于当对孕妇进行X线放射检查时胎儿辐射剂量的系统化数据，因此在实践中很难应用这些检查方法。该问题对于电子计算机断层扫描来说尤其重要，因为虽然该这个问题对于电子计算机断层扫描是一种被广泛使用的、信息量大的放射诊断技术，但是与较高病人辐射剂量有关的。

该研究的目的是使现有的关于进行电子计算机断层扫描时胎儿吸收剂量的数据系统化。

材料和方法。 对俄文和英文出版物进行了搜索和分析。在PubMed/Medline、Google Scholar和eLibrary系统中进行了搜索。最后的分析包括12份出版物，其中有8项使用拟人模型的研究、3项回顾性研究和1个前瞻性临床研究。

结果。 当进行腹部、盆腔和全身电子计算机断层扫描时胎儿吸收的剂量最高。在审查所包括的出版物中，没有关于超过胎儿剂量限制的报告。

结论。 无论扫描区域如何，对孕妇进行一次性单相电子计算机断层扫描的时候，超过胎儿吸收剂量限制（100 mGy）是不太可能的，因此，有需要的话，可以对孕妇进行这样的检查。然而，在进行腹部、盆腔或受伤全身的多次或多相电子计算机断层扫描的情况下，会超过这个阈值。在这种情况下，多科目辐射安全小组（放射科医生和临床专家）应该进行额外的风险评估。

关键词： 怀孕；辐射风险；器官剂量；诊断成像；怀孕期间的胎儿风险；辐射剂量；电子计算机断层扫描；胎儿吸收的剂量。

To cite this article

Vodovatov AV, Golchenko OA, Mashchenko IA, Alekseeva DV, Chipiga LA, Khutornoy IV, Kozlova PV, Trufanov GE, Druzhinina PS, Ryzhov SA, Soldatov IV. 当对孕妇进行电子计算机断层扫描时胎儿吸收剂量的评估：系统综述. *Digital Diagnostics*. 2023;4(2):170–184. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD472150>

收到: 05.06.2023

接受: 19.06.2023

发布日期: 27.06.2023

ОБОСНОВАНИЕ

Безопасное проведение рентгенорадиологических методов диагностики во время беременности является приоритетом как для рентгенологов, так и врачей других специальностей. До середины XX века методы медицинской визуализации с применением источников ионизирующего излучения широко использовались в акушерстве с диагностической и терапевтической целью, пока не появились экспериментальные и эпидемиологические данные о воздействии ионизирующего излучения на развитие плода. После этого Международной комиссией по радиационной защите был установлен ряд ограничений на использование источников ионизирующего излучения у беременных [1].

Негативные эффекты ионизирующего излучения принято разделять на две группы — детерминированные и стохастические.

Детерминированные эффекты — непосредственное повреждение или гибель клеток в результате облучения выше порогового значения. Вероятность возникновения этих эффектов зависит от дозы облучения и гестационного возраста плода. Основными рисками для плода являются врождённые пороки развития внутренних органов и центральной нервной системы (неврологические нарушения и задержки развития). Степень выраженности детерминированных эффектов пропорциональна дозе и частоте исследований.

Чувствительность плода к облучению зависит от гестационного возраста. Наиболее опасно воздействие облучения в период органогенеза (с 5-й по 17-ю неделю гестационного возраста, или с 3-й по 15-ю неделю с момента зачатия). Во втором и третьем триместре устойчивость плода к облучению повышается, однако воздействие в дозе более 500 мГр во втором и третьем триместрах также может привести к неблагоприятным последствиям, включая задержку роста и пороки развития [2].

Согласно современным представлениям, пороговое значение поглощённой дозы в плоде, не приводящей к возникновению негативных эффектов, составляет 100 мГр [3, 4]. По данным международных профессиональных сообществ (Международная комиссия по радиационной защите; Национальный комитет по радиационной защите США; Американский колледж радиологов; Американский колледж акушеров-гинекологов), риск самопроизвольного прерывания беременности и возникновения серьёзных пороков развития у плода, подвергнувшегося облучению в дозе менее 50 мГр, пренебрежимо мал [3–6].

Стохастические эффекты — изменения, индуцированные облучением в отдельных клетках, которые потенциально могут привести к развитию злокачественных новообразований. Стохастические эффекты не имеют порога, и данные об уровне риска их возникновения неоднозначны [7]. Согласно практическим рекомендациям Американского колледжа радиологов, поглощённая доза

в плоде 20 мГр соответствует риску возникновения онкологических заболеваний 1/125 в дополнение к фоновой заболеваемости [6]. По данным Международной комиссии по радиационной защите, риск возникновения онкологических заболеваний у плода ниже и составляет 1/500 при поглощённой дозе в плоде 30 мГр. В отечественной практике исследований, посвящённых оценке риска развития радиационно-индуцированных раков и наследственных эффектов у плода при медицинском облучении, не проводилось [8].

Совершенствование методов медицинской визуализации приводит к расширению спектра их применения в дифференциальной диагностике ряда жизнеугрожающих патологий, что требует оценки безопасности их использования у беременных. Наиболее достоверным способом оценки профиля безопасности методов медицинской визуализации у беременных является количественная оценка уровня облучения плода. При этом необходимо сосредоточиться на патологических состояниях, при которых различные рентгенорадиологические исследования применяются у беременных пациенток наиболее часто: ТЭЛА (тромбоэмболия лёгочной артерии), диссекция аорты, политравма, мочекаменная болезнь, острый аппендицит и диагностика поражения лёгких при новой коронавирусной инфекции COVID-19 [9–12].

Определяющим фактором при выборе метода визуализации у беременных является безопасность исследования для плода [6]. Для снижения возможных рисков развития негативных эффектов должны применяться рекомендации по обеспечению радиационной защиты беременных пациенток. К сожалению, в настоящее время такие рекомендации в отечественной практике отсутствуют. Отсутствуют и отечественные данные по дозам облучения плода при применении тех или иных методов медицинской визуализации [8]. С целью обобщения и анализа современных данных по уровням облучения плода при проведении наиболее высокодозового рентгенорадиологического метода исследования — компьютерной томографии (КТ) — авторами был проведён систематический обзор.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Дизайн исследования

Систематический обзор, выполненный по стандартам PRISMA (2009).

Литературный поиск

В качестве материала исследования использованы научные публикации из библиографических баз Pubmed/Medline, Google Scholar, eLibrary. Дополнительно были рассмотрены существующие иностранные и отечественные рекомендации по применению рентгенорадиологических исследований у беременных.

Ключевые слова: CT, pregnancy, radiation risk, organ dose, diagnostic imaging, fetal risks pregnancy radiation, компьютерная томография, поглощённые дозы в плоде.

После осуществления поискового запроса в базах данных по ключевым словам были исключены дублирующие результаты. Анализ текстового содержания отобранных статей, включая такие параметры, как год публикации, дизайн исследований, цель, методология и результаты, позволил исключить публикации, посвящённые неионизирующим методам лучевой диагностики. Из результатов систематического обзора были исключены те, в которых не проводилось измерения поглощённых доз в плоде и матке, а также исследования, посвящённые оценке дозовых нагрузок при проведении лучевой

терапии и рентгеноскопических исследований. Таким образом, в итоговые результаты систематического обзора было включено 12 публикаций.

Дизайн исследования представлен на рис. 1.

Оцениваемые параметры

В рамках систематического обзора отобранные публикации оценивались по следующим параметрам: поглощённая доза в плоде/эмбрионе, срок гестации, патологическое состояние, анатомическая область исследования, метод оценки поглощённой дозы и количество исследуемых случаев КТ у беременных.

В оценку результатов систематического обзора вошли как данные клинических исследований, так

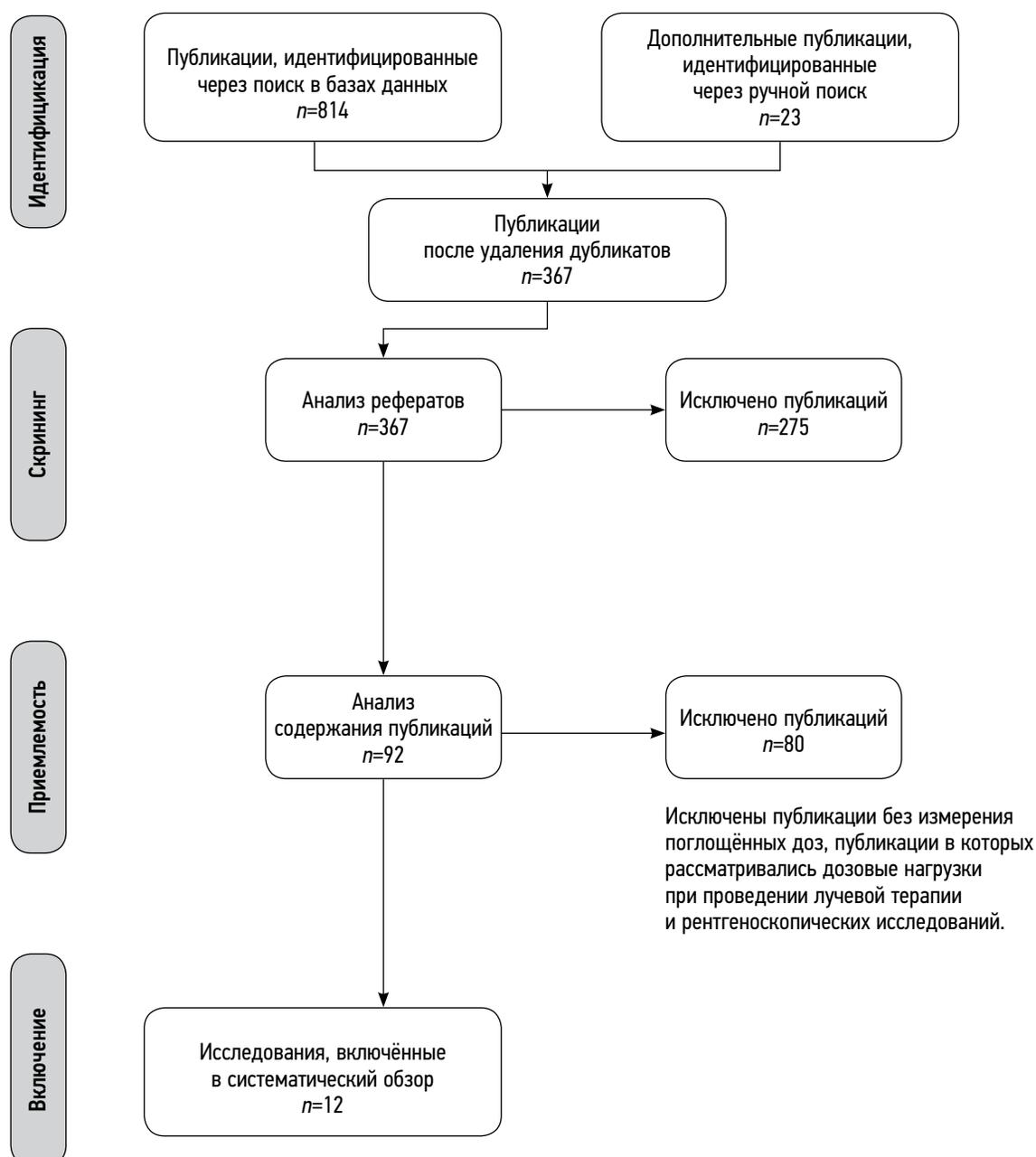


Рис. 1. Дизайн исследования в схеме PRISMA.

и экспериментальные работы с применением антропоморфных фантомов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Всего по поисковым запросам «CT radiation risk in pregnancy», «fetal absorbed doses from diagnostic imaging», «CT fetal dosimetry», «оценка доз облучения плода при КТ» в период с 2007 по 2022 год в библиографических базах Pubmed/Medline, Google Scholar, eLibrary было найдено 837 литературных источников. После предварительного анализа и удаления дублирующихся публикаций в обзор было включено 12 исследований на английском и русском языках, среди них 8 исследований с использованием антропоморфных фантомов, 3 ретроспективных и 1 проспективное клиническое исследование. Каждое исследование оценивалось по параметрам типа и вида исследований, способа измерения и расчёта поглощённых доз. Сводная информация по исследованиям представлена в табл. 1–7.

Измерение и расчёт поглощённых доз

Измерения осуществлялись методами термолюминесцентной (thermoluminescent dosimeter, TLD) или МОП-транзисторной (metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, MOSFET) дозиметрии. В 2 из 8 исследований использовалась технология виртуальных фантомов, которая подразумевает математическое моделирование поглощённых доз.

Оценка поглощённых доз осуществлялась по результатам измерений или с использованием

специализированного программного обеспечения для оценки поглощённых доз в радиочувствительных органах и тканях (IMPACT MC, CT EXPO, NCICT 3.0, Virtual dose CT).

Расчёт поглощённых доз в 2 из 4 клинических исследований осуществлялся при помощи специализированной программы расчёта ImPACT, в двух других исследованиях информация о методах расчёта не приведена.

Срок беременности, моделированный в антропоморфных фантомах, варьировал в диапазоне от 5 до 40 недель. В 5 из 8 исследований длина сканирования составляла 32 см, что соответствует длине стандартного фантома. В 4 исследованиях дополнительно использовались программы с уменьшением длины сканирования, а в 3 — с увеличением.

Сравнительный анализ

Сравнение поглощённых доз в плоде проводилось в нескольких группах, разделённых в соответствии с анатомическими областями сканирования: органы грудной клетки, брюшной полости и малого таза, исследования всего тела при травме (см. табл. 5–7).

Учитывая представленные данные исследований на фантомах, с целью определения общих закономерностей в изменении поглощённой дозы в зависимости от срока беременности и области сканирования, между собой были объединены результаты двух пар исследований — А.В. Водоватова и соавт. [8] и J. Gu и соавт. [13], А. Kelaranta и соавт. [14] и E. Angel и соавт. [15]. В данных исследованиях были сопоставимы сроки

Таблица 1. Характеристики исследований с использованием антропоморфных фантомов

Источник	Способ измерения доз	Расчёт поглощённых доз
Angel и соавт., 2008 [15]	Не представлен	ImPACT; MC; CT Expo
Begano и соавт., 2020 [33]	TLD	VirtualDose CT
Doshi и соавт., 2008 [36]	TLD	По данным TLD-измерений
Kelaranta и соавт., 2017 [14]	MOSFET	ImPACT MC
Водоватов и соавт., 2021 [8]	Не представлен	NCICT3.0
Gilet и соавт., 2011 [37]	TLD	По данным TLD-измерений
Gu и соавт., 2009 [13]	MOSFET	MCNPX По данным MOSFET-измерений
Jaffe и соавт., 2008 [26]	MOSFET	По данным MOSFET-измерений

Примечание. TLD (thermoluminescent dosimeter) — термолюминесцентная дозиметрия; MOSFET (metal-oxide-semiconductor field-effect transistor) — МОП-транзисторная дозиметрия.

Таблица 2. Характеристики клинических исследований

Статья	Вид исследования	Расчёт поглощённых доз
Lazarus и соавт., 2009 [29]	Ретроспективное клиническое	Не представлено
Goldberg-Stein и соавт., 2011 [16]	Ретроспективное клиническое	ImPACT
Litmanovich и соавт., 2009 [32]	Проспективное клиническое	ImPACT
Lazarus и соавт., 2007 [30]	Ретроспективное клиническое	Не представлено

Таблица 3. Протоколы компьютерно-томографических сканирований для антропоморфных фантомов

Источник	Модель КТ-аппарата	Напряжение, кВ	Экспозиция, мАс	Питч фактор	Срок беременности, нед	Длина сканирования, см
Angel и соавт., 2008 [15]	LightSpeed 16, GE	120	100–300	1,375	5–36	46,2
Begano и соавт., 2020 [33]	Definition Flash CT (Siemens Healthineers, Germany)	120	85	1,5	28–38	32 см — стандартная программа; 22 см — короткая программа
Doshi и соавт., 2008 [36]	Siemens Sensation 16 Siemens Somatom Emotion/ Marconi MX8000	100–130	125–250	1,25	35–40	32 см — стандартная программа; 27 см — короткая программа
Gilet и соавт., 2011 [37]	LightSpeed 4 LightSpeed 16 LightSpeed 64 VCT, GE Healthcare	120	100–500	1,375–1,5	5, 10, 18, 32	32
Gu и соавт., 2013 [13]	LightSpeed 16 GE-MDCT	80–140	100	1,375	15,20,31	22 см — грудная клетка; 36 см — брюшная полость
Kelaranta и соавт., 2017 [14]	LightSpeed 64-MDCT GE	100–120	100–300	1,375	12, 20, 28, 38	27 см — грудная клетка; 32 см — брюшная полость; 94 см — травма
Водоватов и соавт., 2021 [8]	Ingenuity 128, Philips/Somatom Definition AS, Siemens/Somatom Scope, Siemens/Emotion 16, Siemens	100–130	60–142	1,048–1,5	8, 10, 12, 15, 20, 25, 30, 35, 38	33
Jaffe и соавт., 2008 [26]	GE LightSpeed 16-MDCT	140	300–380	0,9–1,75	5	32

Таблица 4. Протоколы компьютерно-томографических сканирований для беременных пациенток

Источник	Модель КТ-аппарата	Напряжение, кВ	Экспозиция, мАс	Питч-фактор	Срок беременности, нед	Область исследования (анатомические ориентиры)
Lazarus и соавт., 2007 [30]	Either single-detector row scanner (CTI GE Healthcare, Waukesha, Wis), 4 MDCT Light-speed; GE Healthcare) 16-MDCT Somatom; Siemens, Malvern	140	-	-	5–40	Брюшная полость
Lazarus и соавт., 2009 [29]	-	-	-	-	-	Голова Грудная клетка Брюшная полость и малый таз
Litmanovich и соавт., 2009 [32]	64-MDCT LightSpeed VCT	100	200	0,984	5–36	Грудная клетка От дуги аорты до купола диафрагмы 19,846±2,98 см
Goldberg-Stein и соавт., 2011 [16]	LightSpeed Plus, Light-Speed 16 Pro, LightSpeed Qx/I, High-Speed RP, HighSpeed CT/GE Healthcare)	120–140	180–716	0,9–1,5	5–36	Брюшная полость и малый таз

Таблица 5. Систематизированные данные оценки поглощённых доз в плоде при компьютерной томографии грудной клетки

Источник	Объёмный CTDI, мГр	DLP, мГр×см	Срок беременности, нед	Поглощённая доза в плоде, средние значения, мГр	Поглощённая доза в матке, средние значения, мГр
<i>В исследованиях на фантомах</i>					
Kelaranta и соавт., 2017 [14]	1,34–1,97	476,63–582,22	12	0,03	0,04
			20	0,08	0,09
			28	0,14	0,29
			38	0,22	1,13
Doshi и соавт., 2008 [36]	-	-	35–40	0,23	-
Begano и соавт., 2020 [33]	1,5–4,0	44–137	28–38	0,02–0,12	-
Gilet и соавт., 2011 [37]	-	-	5–32	0,33–0,77	-
Gu и соавт., 2013 [13]	8,1–14,7	-	15	0,13	0,17
			20	0,21	0,33
			31	0,26	0,37
			8	0,09	0,09
			10	0,10	0,10
Водоватов и соавт., 2021 [8]	5,6–9,3	185–306	15	0,08	0,07
			20	0,13	0,09
			25	0,12	0,11
			30	0,16	0,15
			35	0,39	0,33
			38	0,52	0,64
<i>В клинических исследованиях</i>					
Litmanovich и соавт., 2009 [32]	5,21	105,65	5–38	0,02	-
Lazarus и соавт., 2009 [29]	-	-	I, II, III триместр	0,22	-

Примечание. CTDI (computed tomography dose index) — компьютерно-томографический индекс дозы; DLP (dose length product) — произведение дозы на длину сканирования.

Таблица 6. Систематизированные данные оценки поглощённых доз в плоде при компьютерной томографии брюшной полости и малого таза

Источник	Объёмный CTDI, мГр	DLP, мГр×см	Срок беременности, нед	Поглощённая доза в плоде, средние значения, мГр	Поглощённая доза в матке, средние значения, мГр
<i>В исследованиях на фантомах</i>					
Kelaranta и соавт., 2017 [14]	2,63–3,91	102,34–151,86	12	4,7	5,1
			20	5,5	5,8
			28	4,8	4,9
			38	4,8	5,1
Angel и соавт., 2008 [15]	-	-	5	-	-
			12	14,2	-
			15	11,2	11,8
			20	8,5	-
			25	12,3	-
			30	9,7	-
Gu и соавт., 2013 [13]	-	-	15	6,9	-
			35	10,4	-
Gilet и соавт., 2011 [37]	-	-	5, 10, 18, 32	15–20,5	-
<i>В клинических исследованиях</i>					
Lazarus и соавт., 2009 [29]	-	-	I, II, III триместр	17,1	-
Lazarus и соавт., 2007 [30]	-	-	5–40	16	-
Goldberg-Stein и соавт., 2011 [16]	-	-	5–36	24,8	-

Примечание. CTDI (computed tomography dose index) — компьютерно-томографический индекс дозы; DLP (dose length product) — произведение дозы на длину сканирования.

Таблица 7. Систематизированные данные оценки поглощённых доз в плоде при компьютерной томографии при травме в исследованиях на фантомах

Источник	CTDI, мГр	DLP, мГр×см	Срок беременности, нед	Поглощённая доза в плоде, средние значения, мГр	Поглощённая доза в матке, средние значения, мГр
Kelaranta и соавт., 2017 [14]	4,74–5,79	45,18–66,52	12	10,6	11,3
			20	11,2	12,6
			28	10,1	10,3
			38	9,9	10,7
Jaffe и соавт., 2008 [26]	6,55–26,02	-	5	18,0	-

беременности и области сканирования: грудная клетка в исследованиях А.В. Водоватова и J. Gu, брюшная полость и малый таз в исследованиях А. Kelaranta и Е. Angel, а также указаны сходные технические параметры сканирования — экспозиция, питч-фактор и напряжение. Сопоставимость вышеперечисленных данных позволила объединить результаты указанных исследований для проведения сравнительного анализа. Результаты сравнительного анализа представлены на рис. 2. Следует отметить факт существенно меньшей поглощённой дозы в плоде при сканировании органов грудной клетки по сравнению со сканированием брюшной полости. Кроме того, имеет место тенденция незначительного снижения поглощённой дозы в плоде при КТ органов грудной клетки по мере увеличения срока беременности. Для подтверждения указанных закономерностей необходимо проведение дальнейших исследований с увеличением статистической мощности.

Наконец, можно с уверенностью сказать, что представленное в нормативно-методических документах ограничение поглощённой дозы в плоде 100 мГр [3, 5] значительно превышает наблюдаемые уровни облучения

плода при проведении исследований с использованием фантомов. Более того, значения 20 и 30 мГр [5, 6], обуславливающие возможные стохастические эффекты, также не достигаются при однократных однофазных КТ-исследованиях.

Стоит отметить, что во всех клинических исследованиях, включённых в систематический обзор (кроме исследования S. Goldberg-Stein и соавт. [16]), значения поглощённой дозы в плоде также не превышали вышеуказанного диапазона 20–100 мГр. В отношении упомянутого исследования S. Goldberg-Stein и соавт. [16] можно сказать, что параметры сканирования были завышены (до 140 кВ и до 815 мАс), что обуславливало высокое значение поглощённой дозы в плоде, а в расчёт брались многофазные и многократные исследования (отмечено в тексте публикации).

Полученные результаты сравнения позволяют врачу-рентгенологу проводить однократные однофазные КТ-исследования беременным при наличии клинических показаний без излишних опасений. При необходимости проведения повторных сканирований требуется дополнительная оценка рисков.

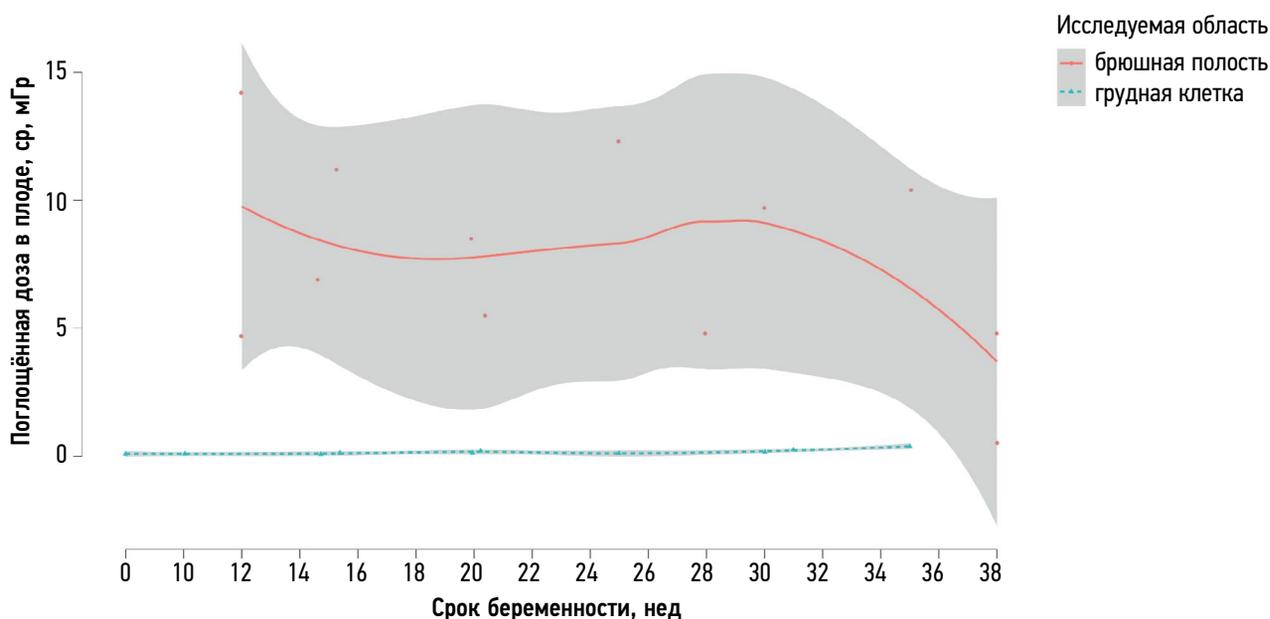


Рис. 2. Сводные результаты по дозиметрии плода при исследованиях органов грудной клетки (работы под руководством А.В. Водоватова [8] и J. Gu [13]) и брюшной полости (работы под руководством А. Kelaranta [14] и Е. Angel [15]) с моделированием линии регрессии LOESS и 95% доверительного интервала.

ОБСУЖДЕНИЕ

Основные подходы к обеспечению радиационной безопасности у беременных аналогичны таковым в остальных группах населения. При невозможности выбора в качестве метода диагностики ультразвукового исследования и магнитно-резонансной томографии основополагающим принципом для применения диагностических методов с использованием ионизирующего излучения является их проведение только по жизненным показаниям, а также снижение дозы облучения настолько, насколько это возможно [17]. Вероятность возникновения жизнеугрожающих осложнений, связанных с диагностикой патологического состояния, должна превышать потенциальный негативный эффект от применения диагностических методов. Использование того или иного метода визуализации должно быть рассмотрено в клинических стандартах лечения, где даны рекомендации по его применению при установленных или предполагаемых диагнозах.

Для соблюдения принципов безопасного подхода к использованию ионизирующих методов диагностики важно осуществлять контроль уровня поглощённой дозы в плоде при проведении исследования и по возможности отказаться от проведения дублирующих исследований [18].

Среди ионизирующих методов лучевой диагностики наиболее информативна компьютерная томография. Неоспоримое преимущество КТ — непродолжительное время исследования в сочетании с высокой информативностью — делает её оптимальным методом диагностики жизнеугрожающих патологий, требующих незамедлительного начала лечения [19, 20]. В зависимости от показаний и диагностических целей при КТ возможно проведение нативного исследования или исследования с применением контрастного усиления. Нативные исследования у беременных могут применяться для диагностики воспалительных заболеваний лёгких, мочекаменной болезни, различных травматических повреждений и т.д. [21, 22]. Выполнение исследований с применением контрастного вещества необходимо в дифференциальной диагностике новообразований, воспалительных изменений, а также при КТ-ангиографии для диагностики тромбозов, повреждений сосудистой стенки и оценки кровоснабжения тех или иных структур [19, 23]. При обследовании беременных пациенток рекомендуется ограничиться только одним из вариантов. При необходимости проведения КТ-исследования с контрастированием рекомендуется исключить нативное исследование, что позволяет сократить время процедуры и снизить дозу облучения.

При проведении диагностики с использованием рентгенорадиологических методов у беременных пациенток следует оценивать поглощённую дозу в плоде [24]. В связи с ограниченными возможностями проведения когортных исследований, посвящённых данному вопросу, в настоящее время широко применяются физические

(антропоморфные) либо цифровые фантомы [25]. Однако фантомные исследования с использованием имитаторов тела человека имеют определённые ограничения. В основном это касается расхождений между размерами фантома и реальных пациентов. Если параметры тела пациента больше, чем параметры используемого фантома, поглощённая доза для него будет завышена, и наоборот, доза может быть занижена, если размеры пациента будут меньше размеров фантома [25]. Тем не менее в качестве экспериментального ориентира целесообразно использовать исследования с применением фантомов, так как значения поглощённых доз в них более детализированы и рассчитаны для каждой недели беременности, в отличие от когортных исследований, в которых результаты расчётов представлены в виде усреднённых доз. Кроме того, значения поглощённых доз, определённых в когортных и фантомных исследованиях, не имели значимых различий (см. табл. 5–7).

Дозы облучения пациентов напрямую зависят от исследуемой области. Когда плод находится за пределами поля облучения (области облучения для КТ), он подвергается воздействию рассеянного излучения. Таким образом, чем дальше от плода расположена область исследования, тем меньше будет поглощённая доза и, как следствие, меньше вероятность развития негативных эффектов [14].

Как показали результаты выполненного обзора литературы, поглощённые дозы в плоде находятся в прямой корреляции с анатомической областью сканирования. Согласно представленным в таблицах данным (см. табл. 5–7), максимальные поглощённые дозы в плоде наблюдаются при КТ всего тела, органов брюшной полости и малого таза. Наименьшие значения поглощённых доз в плоде отмечаются при КТ-сканировании органов грудной клетки. Поглощённые дозы, оценённые для фантомов, сопоставимы с данными, полученными в ходе когортных исследований.

Ни в одном из проанализированных в обзоре зарубежных исследований не зафиксировано превышения порога поглощённой дозы в плоде 100 мГр. В отечественной практике исследования, оценивающие показания к проведению КТ и количество поглощённых доз у беременной и плода при КТ органов брюшной полости и малого таза, не проводились.

На ранних сроках гестации оценка поглощённой дозы в плоде затруднена из-за небольших размеров эмбриона. По данным ряда исследований [8, 26, 27], расхождения между поглощёнными дозами в матке и плоде являются незначительными, поэтому в качестве эквивалента поглощённой дозы в плоде возможно использование поглощённой дозы в матке [28]. В экспериментальных исследованиях установлена зависимость величины поглощённой дозы от срока гестации.

В связи с тем, что в проанализированных когортных исследованиях данные представлены в виде среднего значения поглощённой дозы в плоде для различных

сроков гестации, достоверно определить корреляцию между сроком беременности и уровнем поглощённой дозы для данных исследований невозможно [29–31].

На величину поглощённой дозы, помимо срока беременности и анатомической области исследования, влияют такие технические параметры, как длина зоны сканирования, алгоритм автоматической модуляции силы тока при его наличии, питч и напряжение.

Снижение дозы облучения может быть достигнуто при изменении параметров протокола сканирования и уменьшении длины зоны сканирования. В исследовании D. Litmanovich и др. [32] 26 беременным с подозрением на тромбоэмболию лёгочной артерии (ТЭЛА) была проведена КТ-ангиография лёгочной артерии со снижением напряжения и силы тока, а также с уменьшением длины сканирования в сравнении со стандартным протоколом. При сохранении диагностического качества исследования эффективная доза была существенно ниже, чем в контрольной группе (1,8 и 9,8 мЗв соответственно).

Уменьшение длины зоны сканирования также показало свою эффективность в исследованиях на фантомах [33]. Авторы сообщают о значительном уменьшении средней поглощённой дозы в плоде по сравнению с дозами для стандартной длины сканирования (0,03 и 0,1 мЗв соответственно). Однако существуют определённые риски, связанные с исключением части анатомических структур из зоны сканирования, поэтому необходимо учитывать это при сокращении длины сканирования.

В некоторых исследованиях также рассматривается вопрос целесообразности использования экранов (средств индивидуальной защиты) при проведении рентгенологических исследований при беременности [33, 34]. В проанализированных публикациях говорится об отсутствии необходимости использования дополнительных мер защиты при проведении исследований, органов, удалённых от матки, так как при этом плод в основном подвергается воздействию не прямого, а рассеянного излучения. В этом случае экранирование не обеспечивает снижение облучения плода рассеянным излучением, а играет в большей степени роль психологической защиты. При сравнении с экранированием сокращение длины сканирования показало наибольшую эффективность для снижения поглощённых доз в плоде [34–36]. Кроме того, было показано, что введение экранирующего материала в зону исследования вынуждает систему оптимизации изображения КТ-сканера резко увеличивать мощность излучения трубки, что в конечном итоге приводит к увеличению дозы на беременную женщину и, как следствие, на плод [37].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Лучевая диагностика у беременных должна выполняться в соответствии с подходами к обеспечению радиологической безопасности ввиду возможного

возникновения негативных эффектов, при этом ошибочно полностью избегать применения диагностических исследований с использованием ионизирующего излучения.

При многих жизнеугрожающих состояниях исследования с применением ионизирующего излучения могут быть необходимы, а также являются методом выбора в диагностике ряда патологий. Необходимо учесть, что риски развития осложнений таких патологических состояний, возникающие при несвоевременной диагностике, многократно превышают риск негативных эффектов от воздействия ионизирующего излучения.

Результаты исследований доказывают, что доза, поглощённая плодом при КТ-исследовании, не достигает пороговых значений. При КТ-сканировании грудной клетки поглощённые плодом дозы незначительны и не могут привести к развитию детерминированных эффектов. Более значимая лучевая нагрузка на плод возникает при КТ-сканировании брюшной полости и малого таза, а также при сканировании всего тела, но даже при этих исследованиях превышение допустимого порога облучения маловероятно при условии проведения однократного однофазного исследования. В то же время при многократных КТ-сканированиях органов брюшной полости или всего тела либо при многофазном КТ-исследовании с внутривенным контрастированием допустимый порог поглощённой дозы ионизирующего излучения может быть превышен. Эту информацию необходимо учитывать при направлении беременной на КТ-исследование данных областей. Стоит также учесть другие нежелательные эффекты на развитие плода при применении исследований с контрастным усилением.

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). Наибольший вклад распределён следующим образом: А.В. Водоватов — разработка концепции исследования, систематизация данных, экспертная оценка и финальное редактирование систематического обзора; О.А. Гольченко — поиск публикаций по теме, анализ литературных данных, оформление таблиц, написание текста; И.А. Машенко — разработка концепции исследования, экспертная оценка и финальное редактирование систематического обзора; Д.В. Алексеева — разработка концепции исследования, анализ полученных данных, финальное редактирование систематического обзора; Л.А. Чипига — систематизация данных, экспертная оценка и финальное редактирование

систематического обзора; И.В. Хуторной — дизайн исследования, статистическая обработка полученных результатов, подготовка иллюстраций; П.В. Козлова — поиск публикаций по теме, анализ литературных данных, редактирование текста; Г.Е. Труфанов — разработка концепции исследования, экспертная оценка, утверждение финальной версии статьи; П.С. Дружинина — адаптирование текста статьи, обработка результатов исследования; С.А. Рыжов — постановка задач исследования, участие в описании обсуждения полученных результатов; И.В. Солдатов — участие в обсуждении полученных результатов, экспертная оценка, утверждение финальной версии статьи.

ADDITIONAL INFORMATION

Funding source. This study 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.V. Vodovатов — development of the study concept, systematization of data, peer review, and final editing of the systematic review; O.A. Golchenko — search for publications on the topic, analysis of literature data, design of tables, writing the text; I.A. Mashchenko — development of the research concept, peer review and final editing of the systematic review; D.V. Alekseeva — development of the study concept, analysis of the obtained data, final editing of the systematic review; L.A. Chipiga — data systematization, peer review, and final editing of the systematic review; I.V. Khutornoy — study design, statistical processing of the results, preparation of illustrations; P.V. Kozlova — search for publications on the topic, analysis of literature data, text editing; G.E. Trufanov — development of the research concept, expert evaluation, approval of the final version of the article; P.S. Druzhinina — adaptation of the text of the article, processing of the research results; S.A. Ryzhov, setting research objectives, participating in the description of the discussion of the results obtained; I.V. Soldatov — participation in the discussion of the obtained results, expert evaluation, approval of the final version of the article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Штенцель Р.Э., Семенова Е.С., Мащенко И.А., и др. Исторические аспекты становления и развития методов лучевой диагностики в перинатологии // Трансляционная медицина. 2021. Т. 8, № 3. С. 29–36. doi: 10.18705/2311-4495-2021-8-3-29-36
2. Sadro C., Bernstein M.P., Kanal K.M. Imaging of trauma. Part 2, Abdominal trauma and pregnancy: A radiologist's guide to doing what is best for the mother and baby // Am J Roentgenol. 2012. Vol. 199, N 6. P. 1207–1219. doi: 10.2214/AJR.12.9091
3. Wang P.I., Chong S.T., Kielar A.Z., et al. Imaging of pregnant and lactating patients: Part 1, evidence-based review and recommendations // Am J Roentgenol. 2012. Vol. 198, N 4. P. 778–784. doi: 10.2214/AJR.11.7405
4. Committee Opinion No. 723: Guidelines for diagnostic imaging during pregnancy and lactation // Obstet Gynecol. 2017. Vol. 130, N 4. P. 210–216. doi: 10.1097/AOG.0000000000002355
5. ICRP. Recommendations International Commission on Radiation Protection 2007. Publication ICRP No. 103. Transl. from English. Ed. by M.F. Kiselev, N.K. Shandala. Moscow: Alana; 2009. 312 p.
6. ACR-SPR practice parameter for imaging pregnant or potentially pregnant adolescents and women with ionizing radiation. 2018. 23 p. Режим доступа: <https://www.acr.org/-/media/acr/files/practice-parameters/pregnant-pts.pdf>. Дата обращения: 17.05.2023.
7. Frush D. The cumulative radiation dose paradigm in pediatric imaging // Br J Radiol. 2021. Vol. 94, N 1126. P. 20210478. doi: 10.1259/bjr.20210478
8. Водоватов А.В., Чипига Л.А., Пивень П.А., и др. Оценка поглощённых доз в плоде при проведении компьютерной томографии органов грудной клетки беременной женщины // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 3. С. 126–135. doi: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-126-135
9. Liu H., Liu F., Li J., et al. Clinical and CT imaging features of the COVID-19 pneumonia: Focus on pregnant women and children // J Infect. 2020. Vol. 80, N 5. P. 7–13. doi: 10.1016/j.jinf.2020.03.007
10. Dehan L., Lin L., Xin W., et al. Pregnancy and perinatal outcomes of women with coronavirus disease (COVID-19) pneumonia: A preliminary analysis // Am J Roentgenol. 2020. Vol. 215, N 1. P. 127–132. doi: 10.2214/AJR.20.23072
11. Garcia E.M., Camacho M.A., Karolyi D.R., et al.; Expert Panel on Gastrointestinal Imaging. ACR appropriateness criteria right lower quadrant pain-suspected appendicitis // Am J Roentgenol. 2018. Vol. 15, N 11. P. 373–387. doi: 10.1016/j.jacr.2018.09.033
12. Сажин А.В., Кириенко А.И., Курцер М.А., и др. Острый аппендицит у беременных // Хирургия. Журнал им. Н.И. Пирогова. 2019. № 1. С. 70–77.
13. Gu J., Bednarz B., Caracappa P.F., Xu X.G. The development, validation and application of a multi-detector CT (MDCT) scanner model for assessing organ doses to the pregnant patient and the fetus using Monte Carlo simulations // Phys Med Biol. 2009. Vol. 54, N 9. P. 2699–2717. doi: 10.1088/0031-9155/54/9/007
14. Kellaranta A., Mäkelä T., Kaasalainen T., Kortensniemi M. Fetal radiation dose in three common CT examinations during pregnancy: Monte Carlo study // Phys Med. 2017. N 43. P. 199–206. doi: 10.1016/j.ejmp.2017.09.120
15. Angel E., Wellnitz C.V., Goodsitt M.M., et al. Radiation dose to the fetus for pregnant patients undergoing multidetector CT imaging: Monte Carlo simulations estimating fetal dose for a range of gestational age and patient size // Radiology. 2008. Vol. 249, N 1. P. 220–227. doi: 10.1148/radiol.2491071665
16. Goldberg-Stein S., Liu B., Hahn P.F., Lee S.I. Body CT during pregnancy: Utilization trends, examination indications, and fetal radiation doses // Am

- J Roentgenol. 2011. Vol. 196, N 1. P. 146–151. doi: 10.2214/AJR.10.4271
17. Vandecaveye V., Amant F., Lecouvet F., et al. Imaging modalities in pregnant cancer patients // *Int J Gynecol Cancer*. 2021. Vol. 31, N 3. P. 423–431. doi: 10.1136/ijgc-2020-001779
18. Kwan M.L., Miglioretti D.L., Marlow E.C., et al.; Radiation-Induced Cancers Study Team. Trends in medical imaging during pregnancy in the United States and Ontario, Canada, 1996 to 2016 // *JAMA Network Open*. 2019. N 7. P. 197–249. doi: 10.1001/jamanetworkopen.2019.7249
19. Прокоп М., Галански М. Спиральная и многослойная компьютерная томография. Москва, 2011. 440 с.
20. Араблинский А.В., Магдебурга Ю.А. КТ в диагностике абдоминальной патологии нетравматического генеза // *REJR*. 2018. Т. 8, № 2. С. 58–71. doi: 10.21569/2222-7415-2018-8-2-58-71
21. Kirsch J., Brown R.K., Henry T.S., et al.; Expert Panels on Cardiac and Thoracic Imaging. ACR appropriateness criteria acute chest pain-suspected pulmonary embolism // *J Am Coll Radiol*. 2017. Vol. 14, N 5. P. 2–12. doi: 10.1016/j.jacr.2017.02.027
22. Shyu J.Y., Khurana B., Soto J.A., et al.; Expert Panel on Major Trauma Imaging. ACR appropriateness criteria major blunt trauma // *J Am Coll Radiol*. 2020. Vol. 17, N 5. P. 160–174. doi: 10.1016/j.jacr.2020.01.024
23. Панченко Е.П., Балахонова Т.В., Данилов Н.М., и др. Диагностика и лечение тромбозов лёгочной артерии: клинические рекомендации Евразийской ассоциации кардиологов для практических врачей (2021) // *Евразийский кардиологический журнал*. 2021. № 1. С. 44–77. doi: 10.38109/2225-1685-2021-1-44-77
24. Ria F., D'Ercole L., Origgi D., et al.; Association of Medical Physics Task Group. Statement of the Italian Association of Medical Physics (AIFM) task group on radiation dose monitoring systems // *Insights Imaging*. 2022. Vol. 13, N 1. P. 23. doi: 10.1186/s13244-022-01155-1
25. Sensakovic W.F., Royall I., Hough M., et al. Fetal dosimetry at CT: A primer // *Radiographics*. 2020. Vol. 40, N 4. P. 1061–1070. doi: 10.1148/rg.2020190166
26. Jaffe T.A., Yoshizumi T.T., Toncheva G.I., et al. Early first-trimester fetal radiation dose estimation in 16-MDCT without and with automated tube current modulation // *Am J Roentgenol*. 2008. Vol. 190, N 4. P. 860–864. doi: 10.2214/AJR.07.2925
27. Huda W., Randazzo W., Tipnis S., et al. Embryo dose estimates in body CT // *Am J Roentgenol*. 2010. Vol. 194, N 4. P. 874–880. doi: 10.2214/AJR.09.4032
28. Damilakis J., Perisinakis K., Tzedakis A., et al. Radiation dose to the conceptus from multidetector CT during early gestation: A method that allows for variations in maternal body size and conceptus position // *Radiology*. 2010. Vol. 257, N 2. P. 483–489. doi: 10.1148/radiol.10092397
29. Lazarus E., Debenedictis C., North D., et al. Utilization of imaging in pregnant patients: 10-year review of 5270 examinations in 3285 patients 1997–2006 // *Radiology*. 2009. Vol. 251, N 2. P. 517–524. doi: 10.1148/radiol.2512080736
30. Lazarus E., Mayo-Smith W.W., Mainiero M.B., Spencer P.K. CT in the evaluation of nontraumatic abdominal pain in pregnant women // *Radiology*. 2007. Vol. 244, N 3. P. 784–790. doi: 10.1148/radiol.2443061634
31. Goldberg-Stein S.A., Liu B., Hahn P.F., Lee S.I. Radiation dose management: Part 2, estimating fetal radiation risk from CT during pregnancy // *Am J Roentgenol*. 2012. Vol. 198, N 4. P. 352–356. doi: 10.2214/AJR.11.7458
32. Litmanovich D., Boiselle P.M., Bankier A.A., et al. Dose reduction in computed tomographic angiography of pregnant patients with suspected acute pulmonary embolism // *J Comput Assist Tomogr*. 2009. Vol. 33, N 6. P. 961–966. doi: 10.1097/RCT.0b013e318198cd18
33. Begano D., Söderberg M., Bolejko A. To use or not use patient shielding on pregnant women undergoing CT pulmonary angiography: A phantom study // *Radiation Protection Dosimetry*. 2020. Vol. 189, N 4. P. 458–465.
34. Ryckx N., Sans-Merce M., Schmidt S., et al. The use of out-of-plane high Z patient shielding for fetal dose reduction in computed tomography: Literature review and comparison with Monte-Carlo calculations of an alternative optimisation technique // *Phys Med*. 2018. N 48. P. 156–161. doi: 10.1016/j.ejmp.2018.03.017
35. Tack D., Kalra M.K., Gevenois P.A. Radiation dose from multidetector CT (2nd ed.). Springer, 2012. doi: 10.1007/978-3-642-24535-0
36. Doshi S.K., Negus I.S., Oduko J.M. Fetal radiation dose from CT pulmonary angiography in late pregnancy: A phantom study // *Br J Radiol*. 2008. Vol. 81, N 968. P. 653–658. doi: 10.1259/bjr/22775594
37. Gilet A.G., Dunkin J.M., Fernandez T.J., et al. Fetal radiation dose during gestation estimated on an anthropomorphic phantom for three generations of CT scanners // *Am J Roentgenol*. 2011. Vol. 196, N 5. P. 1133–1137. doi: 10.2214/AJR.10.4497

REFERENCES

1. Shtentsel RE, Semenova ES, Mashchenko IA, et al. The history of the formation and development of methods of radiation diagnostics in perinatology. *Translational Med*. 2021;8(3):29–36. (In Russ). doi: 10.18705/2311-4495-2021-8-3-29-36
2. Sadro C, Bernstein MP, Kanal KM. Imaging of trauma. Part 2, Abdominal trauma and pregnancy: A radiologist's guide to doing what is best for the mother and baby. *Am J Roentgenol*. 2012;199(6):1207–1219. doi: 10.2214/AJR.12.9091
3. Wang PI, Chong ST, Kielar AZ, et al. Imaging of pregnant and lactating patients: Part 1, evidence-based review and recommendations. *Am J Roentgenol*. 2012;198(4):778–784. doi: 10.2214/AJR.11.7405
4. Committee Opinion No. 723: Guidelines for diagnostic imaging during pregnancy and lactation. *Obstet Gynecol*. 2017;130(4):210–216. doi: 10.1097/AOG.0000000000002355
5. ICRP. Recommendations International Commission on Radiation Protection 2007. Publication ICRP No. 103. Transl. from English. Ed. by M.F. Kiselev and N.K. Shandala. Moscow: Alana; 2009. 312 p.
6. ACR-SPR practice parameter for imaging pregnant or potentially pregnant adolescents and women with ionizing radiation. 2018. 23 p. Available from: <https://www.acr.org/-/media/acr/files/practice-parameters/pregnant-pts.pdf>. Accessed: 17.05.2023.

7. Frush D. The cumulative radiation dose paradigm in pediatric imaging. *Br J Radiol.* 2021;94(1126):20210478. doi: 10.1259/bjr.20210478
8. Vodovатов AV, Chipiga LA, Piven PA, et al. Assessment of the absorbed doses in the fetus from the computed tomography of the chest for the pregnant women. *Radiatsionnaya Gygiena.* 2021;14(3):126–135. (In Russ). doi: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-126-135
9. Liu H, Liu F, Li J, et al. Clinical and CT imaging features of the COVID-19 pneumonia: Focus on pregnant women and children. *J Infect.* 2020;80(5):7–13. doi: 10.1016/j.jinf.2020.03.007
10. Dehan L, Lin L, Xin W, et al. Pregnancy and perinatal outcomes of women with coronavirus disease (COVID-19) pneumonia: A preliminary analysis. *Am J Roentgenol.* 2020;215(1):127–132. doi: 10.2214/AJR.20.23072
11. Garcia EM, Camacho MA, Karolyi DR, et al.; Expert Panel on Gastrointestinal Imaging. ACR appropriateness criteria right lower quadrant pain-suspected appendicitis. *Am J Roentgenol.* 2018;15(11):373–387. doi: 10.1016/j.jacr.2018.09.033
12. Sazhin AV, Kirienko AI, Kurtser MA, et al. Acute appendicitis during pregnancy (in Russian only). *Pirogov Russian Journal of Surgery.* 2019;(1):70–77. (In Russ).
13. Gu J, Bednarz B, Caracappa PF, Xu XG. The development, validation and application of a multi-detector CT (MDCT) scanner model for assessing organ doses to the pregnant patient and the fetus using Monte Carlo simulations. *Phys Med Biol.* 2009;54(9):2699–2717. doi: 10.1088/0031-9155/54/9/007
14. Kelaranta A, Mäkelä T, Kaasalainen T, Kortensniemi M. Fetal radiation dose in three common CT examinations during pregnancy: Monte Carlo study. *Phys Med.* 2017;(43):199–206. doi: 10.1016/j.ejmp.2017.09.120
15. Angel E, Wellnitz CV, Goodsitt MM, et al. Radiation dose to the fetus for pregnant patients undergoing multidetector CT imaging: Monte Carlo simulations estimating fetal dose for a range of gestational age and patient size. *Radiology.* 2008;249(1):220–227. doi: 10.1148/radiol.2491071665
16. Goldberg-Stein S, Liu B, Hahn PF, Lee SI. Body CT during pregnancy: Utilization trends, examination indications, and fetal radiation doses. *Am J Roentgenol.* 2011;196(1):146–151. doi: 10.2214/AJR.10.4271
17. Vandecaveye V, Amant F, Lecouvet F, et al. Imaging modalities in pregnant cancer patients. *Int J Gynecol Cancer.* 2021;31(3):423–431. doi: 10.1136/ijgc-2020-001779
18. Kwan ML, Miglioretti DL, Marlow EC, et al.; Radiation-Induced Cancers Study Team. Trends in medical imaging during pregnancy in the United States and Ontario, Canada, 1996 to 2016. *JAMA Network Open.* 2019(7):197–249. doi: 10.1001/jamanetworkopen.2019.7249
19. Prokop M, Galanski M. Spiral and multilayered computed tomography. Moscow; 2011. 440 p. (In Russ).
20. Arablinskiy AV, Magdeburu YA. CT in the diagnosis of nontraumatic acute abdomen. *REJR.* 2018;8(2):58–71. (In Russ). doi: 10.21569/2222-7415-2018-8-2-58-71
21. Kirsch J, Brown RK, Henry TS, et al.; Expert Panels on Cardiac and Thoracic Imaging. ACR appropriateness criteria acute chest pain-suspected pulmonary embolism. *J Am Coll Radiol.* 2017;14(5):2–12. doi: 10.1016/j.jacr.2017.02.027
22. Shyu JY, Khurana B, Soto JA, et al. Expert Panel on Major Trauma Imaging. ACR appropriateness criteria major blunt trauma. *J Am Coll Radiol.* 2020;17(5):160–174. doi: 10.1016/j.jacr.2020.01.024
23. Panchenko EP, Balahonova TV, Danilov NM, et al. Diagnosis and management of pulmonary embolism Eurasian Association of Cardiology (EAC) clinical practice guidelines (2021). *Eurasian Heart J.* 2021;(1):44–77. (In Russ). doi: 10.381092225-1685-2021-1-44-77
24. Ria F, D'Ercole L, Origgi D, et al.; Association of Medical Physics Task Group. Statement of the Italian Association of Medical Physics (AIFM) task group on radiation dose monitoring systems. *Insights Imaging.* 2022;13(1):23. doi: 10.1186/s13244-022-01155-1
25. Sensakovic WF, Royall I, Hough M, et al. Fetal dosimetry at CT: A primer. *Radiographics.* 2020;40(4):1061–1070. doi: 10.1148/rg.2020190166
26. Jaffe TA, Yoshizumi TT, Toncheva GI, et al. Early first-trimester fetal radiation dose estimation in 16-MDCT without and with automated tube current modulation. *Am J Roentgenol.* 2008;190(4):860–864. doi: 10.2214/AJR.07.2925
27. Huda W, Randazzo W, Tipnis S, et al. Embryo dose estimates in body CT. *Am J Roentgenol.* 2010;194(4):874–880. doi: 10.2214/AJR.09.4032
28. Damilakis J, Perisinakis K, Tzedakis A, et al. Radiation dose to the conceptus from multidetector CT during early gestation: A method that allows for variations in maternal body size and conceptus position. *Radiology.* 2010;257(2):483–489. doi: 10.1148/radiol.10092397
29. Lazarus E, Debenedictis C, North D, et al. Utilization of imaging in pregnant patients: 10-year review of 5270 examinations in 3285 patients 1997–2006. *Radiology.* 2009;251(2):517–524. doi: 10.1148/radiol.2512080736
30. Lazarus E, Mayo-Smith WW, Mainiero MB, Spencer PK. CT in the evaluation of nontraumatic abdominal pain in pregnant women. *Radiology.* 2007;244(3):784–790. doi: 10.1148/radiol.2443061634
31. Goldberg-Stein SA, Liu B, Hahn PF, Lee SI. Radiation dose management: Part 2, estimating fetal radiation risk from CT during pregnancy. *Am J Roentgenol.* 2012;198(4):352–356. doi: 10.2214/AJR.11.7458
32. Litmanovich D, Boiselle PM, Bankier AA, et al. Dose reduction in computed tomographic angiography of pregnant patients with suspected acute pulmonary embolism. *J Comput Assist Tomogr.* 2009;33(6):961–966. doi: 10.1097/RCT.0b013e318198cd18
33. Begano D, Söderberg M, Bolejko A. To use or not use patient shielding on pregnant women undergoing CT pulmonary angiography: A phantom study. *Radiation Protection Dosimetry.* 2020;189(4):458–465.
34. Ryckx N, Sans-Merce M, Schmidt S, et al. The use of out-of-plane high Z patient shielding for fetal dose reduction in computed tomography: Literature review and comparison with Monte-Carlo calculations of an alternative optimisation technique. *Phys Med.* 2018;(48):156–161. doi: 10.1016/j.ejmp.2018.03.017
35. Tack D, Kalra MK, Gevenois PA. Radiation dose from multidetector CT (2nd ed.). Springer; 2012. doi: 10.1007/978-3-642-24535-0
36. Doshi SK, Negus IS, Oduko JM. Fetal radiation dose from CT pulmonary angiography in late pregnancy: A phantom study. *Br J Radiol.* 2008;81(968):653–658. doi: 10.1259/bjr/22775594
37. Gilet AG, Dunkin JM, Fernandez TJ, et al. Fetal radiation dose during gestation estimated on an anthropomorphic phantom for three generations of CT scanners. *Am J Roentgenol.* 2011;196(5):1133–1137. doi: 10.2214/AJR.10.4497

ОБ АВТОРАХ

* **Водоватов Александр Валерьевич**, канд. биол. наук;
адрес: Россия, 197101, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8;
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5191-7535>;
eLibrary SPIN: 4560-8978; e-mail: vodovatoff@gmail.com

Гольченко Ольга Андреевна;
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4614-9241>;
e-mail: breakerxolyga@yandex.ru

Машченко Ирина Александровна, канд. мед. наук, вед. науч. сотр., доцент;
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4949-8829>;
eLibrary SPIN: 5154-7080;
e-mail: mashchenko_ia@almazovcentre.ru

Алексеева Дарья Владимировна, ассистент;
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9528-9377>;
eLibrary SPIN: 6484-4327; e-mail: darja-karpova@yandex.ru

Чипига Лариса Александровна, канд. тех. наук, науч. сотр., доцент;
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9153-3061>;
eLibrary SPIN: 3920-7798; e-mail: larisa.chipiga@gmail.com

Хуторной Иван Валерьевич, аспирант;
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5405-603X>;
eLibrary SPIN: 8020-0222; e-mail: mcdm.avk@gmail.com

Козлова Полина Викторовна, ассистент;
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3240-7038>;
eLibrary SPIN: 3555-0410; e-mail: apollinaria@bk.ru

Труфанов Геннадий Евгеньевич, докт. мед. наук;
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1611-5000>;
eLibrary SPIN: 3139-3581; e-mail: trufanovge@mail.ru

Дружинина Полина Сергеевна, мл. науч. сотр.;
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2921-067X>;
eLibrary SPIN: 9003-3234; e-mail: druzhininapauline@gmail.com

Рыжов Сергей Анатольевич, науч. сотр.;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0640-7368>;
eLibrary SPIN: 6595-4011; e-mail: mosrg@mail.ru

Солдатов Илья Владимирович;
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4867-0746>;
eLibrary SPIN: 4065-6048; e-mail: npcmr@mail.ru

AUTHORS' INFO

* **Aleksandr V. Vodovатов**, Cand. Sci. (Biol.);
address: 8 Mira street, 197101 Saint Petersburg, Russia;
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5191-7535>;
eLibrary SPIN: 4560-8978; e-mail: vodovatoff@gmail.com

Olga A. Golchenko;
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4614-9241>;
e-mail: breakerxolyga@yandex.ru

Irina A. Mashchenko, MD, Cand. Sci. (Med.), Leading Researcher, Assistant Professor;
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4949-8829>;
eLibrary SPIN: 5154-7080;
e-mail: mashchenko_ia@almazovcentre.ru

Darya V. Alekseeva, Assistant Lecturer;
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9528-9377>;
eLibrary SPIN: 6484-4327; e-mail: darja-karpova@yandex.ru

Larisa A. Chipiga, Cand. Sci. (Engin.), Research Associate, Assistant Professor;
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9153-3061>;
eLibrary SPIN: 3920-7798; e-mail: larisa.chipiga@gmail.com

Ivan V. Khutornoy, Graduate Student;
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5405-603X>;
eLibrary SPIN: 8020-0222; e-mail: mcdm.avk@gmail.com

Polina V. Kozlova, Assistant Lecturer;
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3240-7038>;
eLibrary SPIN: 3555-0410; e-mail: apollinaria@bk.ru

Gennady E. Trufanov, MD, Dr. Sci. (Med.);
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1611-5000>;
eLibrary SPIN: 3139-3581; e-mail: trufanovge@mail.ru

Polina S. Druzhinina, Junior Research Associate;
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2921-067X>;
eLibrary SPIN: 9003-3234; e-mail: druzhininapauline@gmail.com

Sergey A. Ryzhov, Research Associate;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0640-7368>;
eLibrary SPIN: 6595-4011; e-mail: mosrg@mail.ru

Ilya V. Soldatov;
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4867-0746>;
eLibrary SPIN: 4065-6048; e-mail: npcmr@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD321420>

Технология распознавания речи в лучевой диагностике

Н.Д. Кудрявцев¹, К.А. Бардасова², А.Н. Хоружая¹

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

² Уральский государственный медицинский университет, Екатеринбург, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Устройства, способные распознавать речь, являются перспективным инструментом для системы здравоохранения. Технология распознавания речи имеет довольно длинную историю применения в западных системах здравоохранения (с 1970-х годов), однако широкое распространение она получила лишь в начале XXI века, заменив медицинских транскрипционистов. Для отечественного здравоохранения данная технология относительно новая. Её активная разработка началась лишь в начале 2010-х годов, а повсеместное внедрение в здравоохранение — в конце 2010-х годов. Такая задержка связана с особенностями русского языка и ограничением вычислительных мощностей, присутствующих в начале XXI века.

В настоящее время комплексы устройств и программного обеспечения для распознавания речи используются в голосовом заполнении медицинской документации и позволяют сократить время подготовки протоколов рентгенологических исследований при сравнении с традиционным (клавиатурным) вводом текста.

В литературном обзоре отражена краткая история развития и применения технологии распознавания речи в лучевой диагностике. Отражены ключевые научные исследования, подтверждающие эффективность её использования в западных системах здравоохранения. Продемонстрирован отечественный опыт применения технологии распознавания речи и оценена её эффективность. Описаны перспективы дальнейшего развития данной технологии в российском здравоохранении.

Ключевые слова: научный обзор; технология распознавания речи; голосовой ввод; лучевая диагностика; рентгенология; заполнение медицинской документации.

Как цитировать

Кудрявцев Н.Д., Бардасова К.А., Хоружая А.Н. Технология распознавания речи в лучевой диагностике // *Digital Diagnostics*. 2023. Т. 4, № 2. С. 185–196.
DOI: <https://doi.org/10.17816/DD321420>

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD321420>

Speech recognition technology in radiology

Nikita D. Kudryavtsev¹, Kristina A. Bardasova², Anna N. Khoruzhaya¹

¹ Moscow Center for Diagnostics and Telemedicine, Moscow, Russian Federation

² Ural State Medical University, Ekaterinburg, Russian Federation

ABSTRACT

Speech recognition devices are promising tools for the healthcare system. Speech recognition technology has had a relatively long history of use in Western healthcare systems since the 1970s. However, it became widely used at the beginning of the 21st century, replacing medical transcriptionists. This technology is relatively new in home healthcare. Its active development began only in the early 2010s, and its implementation in healthcare started in late 2010. This delay is due to the idiosyncrasies of the Russian language and the limited computational power present at the beginning of the 21st century.

Currently, complexes of devices and software for speech recognition are used in the voice filling of medical records and can reduce the time for preparing reports for radiological examinations compared with traditional (keyboard) text input.

The literature review provides a brief history of speech recognition technology development and application in radiography. Key scientific studies showing its efficacy in Western healthcare systems are reflected. Voice recognition technology in the home is demonstrated, and its effectiveness is evaluated. The prospects for further development of this technology in Russian healthcare are described.

Keywords: medical records; radiation diagnostics; radiology; speech recognition software; voice input.

To cite this article

Kudryavtsev ND, Bardasova KA, Khoruzhaya AN. Speech recognition technology in radiology. *Digital Diagnostics*. 2023;4(2):185–196.

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD321420>

Received: 17.03.2023

Accepted: 19.04.2023

Published: 25.05.2023

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD321420>

语音识别技术在放射诊断中的应用

Nikita D. Kudryavtsev¹, Kristina A. Bardasova², Anna N. Khoruzhaya¹

¹ Moscow Center for Diagnostics and Telemedicine, Moscow, Russian Federation

² Ural State Medical University, Ekaterinburg, Russian Federation

简评

能够进行语音识别的设备是保健系统的一个有前途的工具。语音识别技术在西方医疗系统中有相当长的使用历史（自20世纪70年代以来），但它在21世纪初才得到了广泛推广，取代了医疗抄写员。对于国内的医疗保健来说，该技术是相对较新的。它的积极开发是在2010年代初才开始，并2010年代末才在保健事业广泛采用的。这种延迟是由于俄语的特点和21世纪初计算能力的限制而导致的。

语音识别的设备和软件包现在被用于通过语言输入填写病历，此外，与传统（用键盘）文本输入相比，减少了准备X射线学协议所需的时间。

本文献综述简要介绍了语音识别技术在放射诊断中的发展和应用的历史。介绍了证实其在西方医疗系统中使用的有效性的主要科学研究。展示了国内使用语音识别技术的经验，并对其有效性进行了评估。描述了该技术在俄罗斯保健事业进一步发展的前景。

关键词：科学综述；语音识别技术；语音输入；放射诊断；X射线学；填写病历。

To cite this article

Kudryavtsev ND, Bardasova KA, Khoruzhaya AN. 语音识别技术在放射诊断中的应用. *Digital Diagnostics*. 2023;4(2):185–196.

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD321420>

收到: 17.03.2023

接受: 19.04.2023

发布日期: 25.05.2023

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время голосовое управление превратилось в стандартную функцию для многих бытовых «умных» устройств. Это стало возможным благодаря развитию технологии распознавания речи. Системы, построенные на её основе, анализируют речь пользователя и трансформируют её в цифровые данные. Помимо управления «умными» устройствами, технология распознавания речи получила широкое распространение в телефонной связи. Сейчас при звонках во многие государственные и коммерческие организации пользователя встречает автоответчик, который распознаёт голосовой запрос звонящего и маршрутизирует его на выбранного специалиста. В Москве в 2019 году был запущен проект по уведомлению граждан о записи к врачу и напоминании о диспансерном наблюдении с помощью голосового помощника. Во время подобного звонка гражданин мог записаться к медицинскому специалисту, отменить или перенести свою консультацию, также система опрашивала пациента о наличии жалоб¹.

В области здравоохранения системы распознавания речи получили широкое распространение при голосовом заполнении медицинской документации. Это связано с тем, что большую часть своего рабочего времени врачи тратят на подготовку медицинской документации [1–4]. Данный фактор отрицательно сказывается на качестве оказания медицинской помощи, особенно в условиях ограниченного времени приёма пациента. Перспектива применения технологии, например, в лучевой диагностике связана с сокращением длительности заполнения протоколов диагностических исследований и возможностью уделять больше времени на изучение диагностических изображений, сопроводительной медицинской документации и общение с пациентами. Именно поэтому наибольшую популярность системы голосового ввода получили в рентгенологических отделениях, поскольку организация рабочего процесса в них наиболее удобна для внедрения подобной технологии. Современные систематические обзоры [5–7] продемонстрировали, что применение систем распознавания речи в данных условиях эффективно, а хорошая восприимчивость объясняется большими объёмами текстовой информации, которую врачи-рентгенологи обязаны заносить в протоколы.

ИСТОРИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ РАСПОЗНАВАНИЯ РЕЧИ В РЕНТГЕНОЛОГИИ

Ранние годы применения

Первые попытки медицинского применения технологии распознавания речи были предприняты в 70–80-х

годах прошлого столетия. В 1975 году был описан прототип системы распознавания речи, которая могла проанализировать крайне ограниченный объём медицинской лексики и терминологии [8]. В отделении лучевой диагностики технология была впервые апробирована в 1981 году [9]. В израильской больнице Beth Israel Hospital её начали использовать для подготовки протоколов рентгенологических исследований. Изначально врачи этого учреждения применяли систему CLIP (Coded Language Information Processing) — иерархический стандартизированный язык медицинских терминов, разработанный М. Simon и В.В. Leeming [10]. Структура этого языка содержала медицинские термины, закодированные определённым образом. Например, значению А соответствовала *anatomic area* (анатомическая область), А6 — *the lower limb* (нижняя конечность), А61 — *the thigh* (бедро), в свою очередь значениями В, В6, В61, В611 и В612 были закодированы *bone* (кость), *the lower limb bones* (кости нижней конечности), *the femur* (бедренная кость), *the lesser trochanter* (малый вертел) и *the greater trochanter* (большой вертел) соответственно. Набирая различные комбинации кодов с помощью клавиатуры, врач-рентгенолог мог составить протокол любой сложности и объёма [11].

Системы распознавания речи тех времён имели главный недостаток — ограниченный словарь (около 200 уникальных медицинских терминов), что было связано с малым объёмом оперативной памяти. Этот фактор не позволял в полном объёме описывать диагностические исследования. Одним из решений, позволяющих обойти ограничение объёма рабочей памяти, стало использование технологии распознавания речи совместно с системой CLIP.

В исследовании 1981 года было проведено сравнение клавиатурного и голосового вводов [9]. Оценивались скорость и качество подготовки 60 протоколов радиологических исследований. В результате оказалось, что объём протокола не зависел от способа заполнения, что косвенно подтверждало и схожую сложность описываемых исследований. Длительность же заполнения протокола с помощью голосового ввода в 4 раза превышала длительность клавиатурного ввода. Протоколы, заполненные голосом, содержали в среднем 12 ошибок распознавания, в то время как протоколы, подготовленные с помощью клавиатуры, не имели таковых. В ходе этого исследования были описаны также дополнительные ограничения технологии. Первые системы не могли полностью подавить внешние шумы, поэтому качество распознавания врачебной речи было низким, что способствовало появлению ошибок. Увеличение длительности заполнения медицинского документа было связано с тем, что система могла распознать только отдельно произнесённые слова. Врачу приходилось делать паузу между словами,

¹ Официальный сайт Мэра Москвы [интернет]. Голосовой помощник соберёт жалобы на самочувствие пациента по телефону перед приемом в поликлинике. Режим доступа: <https://www.mos.ru/news/item/89302073/>.

а в случае с системой CLIP — между кодами. Такой метод голосового заполнения был неудобным и неестественным для человека. Стоит также отметить, что система голосового ввода требовала от 3 до 6 часов предварительной настройки и адаптации под конкретную речь пользователя (врача).

Все эти ограничения не позволили системам распознавания речи тех времён получить распространение в здравоохранении. По этой причине привлечение медицинских транскрипционистов на тот период времени было оправданным. Тем не менее появился тот базис, который позволил учесть «слабые места» технологии на последующих этапах развития.

Возрастающая доступность рентгенологических исследований, появление компьютерных и магнитно-резонансных томографов, переход от аналоговых носителей к цифровым привели к повышению рабочей нагрузки на врачей-рентгенологов и увеличению длительности подготовки заключений. Для решения этой проблемы и оптимизации кадровых ресурсов в середине 80-х годов в западных странах были организованы диктофонные центры. Врачи-рентгенологи диктовали на звукозаписывающие устройства описания рентгенологических находок, выявленных во время интерпретации диагностических изображений. Аудиозаписи передавались в диктофонный центр, где медицинские транскрипционисты расшифровывали аудиозаписи и оформляли протоколы исследований в текстовом виде. Подготовленные протоколы проверял и визирует врач. В некоторых случаях они возвращались транскрипционистам для исправления ошибок [12]. Диктофонные центры были популярными в зарубежных медицинских учреждениях вплоть до 2010-х годов [5, 13].

Ряд авторов провели сравнение эффективности подготовки протоколов рентгенологических исследований с помощью медицинских транскрипционистов и технологии распознавания речи. Были сделаны выводы, что основное преимущество медицинского транскрипциониста заключается в возможности заметить грамматические ошибки и учесть контекстную информацию о пациенте. Эти преимущества позволяют правильно понять и согласовать аудиозапись врача, даже если она плохого качества [14]. Однако в связи с дефицитом медицинских транскрипционистов зачастую возникали ситуации, когда протокол в печатном виде возвращался врачу только через 16 часов после диктовки [15]. В зависимости от мощности диктофонного центра для расшифровки аудиозаписей требовалось от 6 до 24 часов.

Дальнейшее развитие систем распознавания речи со временем вытеснило медицинских транскрипционистов [14]. Несмотря на то что технологии распознавания речи уступают в точности распознавания медицинским транскрипционистам, они позволяют сократить

ежемесячные экономические расходы отделения лучевой диагностики на 81% и значительно сократить время подготовки протоколов исследований [5, 13, 16].

В отечественной системе здравоохранения также предпринимались попытки внедрения диктофонных центров², однако в открытом доступе отсутствуют научные исследования, оценивающие эффективность их применения. В связи с отсутствием подобных центров в современной отечественной системе здравоохранения можно предположить также, что их применение оказалось нецелесообразным.

1990-е: новый виток развития инновации

В конце XX века в системах распознавания речи был увеличен объём памяти и словарей (до 19 000 рентгенологических терминов), сокращено время предварительной настройки до нескольких минут и повышена точность распознавания. В 1995 году в США были представлены первые программы расшифровки естественного языка, позволяющие определять слитную английскую речь. Теперь врач мог диктовать в удобном разговорном темпе, не делая пауз между словами. На данном этапе эти программы уступали в точности распознавания системам с отдельным вводом [17]. Дальнейшее развитие технологий и повышение точности распознавания речи позволило системам слитного голосового ввода заменить системы с отдельным вводом.

XXI век

Широкомасштабное внедрение и применение автоматического распознавания речи в отделениях лучевой диагностики началось в западных странах в начале 2000-х годов. В зарубежных исследованиях сравнили скорость голосового заполнения англоязычной медицинской документации с клавиатурным вводом, объёмы медицинского документа и удовлетворённость врачей. Полученные данные показали, что использование технологии ведёт к повышению скорости заполнения документации на 26% и увеличению объёма протоколов. Голосовой ввод позволил также оптимизировать рабочий процесс, сократив время, необходимое для подготовки медицинской документации, улучшив качество протоколов по содержанию. У врачей повысилась удовлетворённость от работы с документацией [16, 18]. Частота ошибок также сократилась, преимущественно встречались пунктуационные ошибки [7]. Вышеперечисленные факторы привели к сокращению общего времени подготовки протоколов исследований с 16 до 5 часов [15]. Результаты исследований, оценивающие затрату времени на подготовку протокола, среднее количество символов в минуту, количество и частоту ошибок, отражают позитивную динамику в развитии

² Официальный сайт ГБУЗ «ИКБ № 1 ДЗМ» [интернет]. История больницы. Режим доступа: <https://ikb1.ru/about/>.



Рис. 1. Упрощённая схема работы классической системы распознавания речи. Представлен алгоритм распознавания фразы «Признаки остеохондроза».

технологии и внедрении её в отделениях лучевой диагностики. Процент готовых протоколов в течение одного часа увеличился с 26 до 58%, протоколы стали более структурированы по содержанию [19].

Экономические затраты с течением времени тоже сократились. Так, в 5 из 7 систематических обзоров [5], оценивающих затраты, сообщалось об уменьшении, в 2 — об увеличении экономических затрат. Похожие результаты были продемонстрированы в эндокринологии и психиатрии, где использование систем распознавания речи позволило повысить продуктивность и эффективность работы врачей [20]. Применение этих систем в хирургии помогло сократить время подготовки протоколов операций с 4 до 3 дней, а количество подготовленных протоколов в течение одного дня повысилось с 22 до 37% [21]. Авторы зарубежных исследований 2019–2020-х годов делают вывод, что технология распознавания речи экономит врачам время, повышает их эффективность и позволяет документировать более важные детали при заполнении медицинских бумаг [22–24], однако основным препятствием для внедрения систем голосового ввода среди врачей можно считать человеческий фактор — их сопротивление переменам и страх перед новыми технологиями [25].

В 2016 году в исследовании Microsoft research было продемонстрировано, что точность систем распознавания речи достигла уровня человеческих возможностей и составила 94% [26]. Сейчас эта технология прочно вошла в медицинскую практику в англоязычных странах, а уровень внедрения голосового ввода в отделениях лучевой диагностики достиг 85%³. На сегодняшний день доля рынка, занимаемая подобными программами для нужд здравоохранения, составляет около 25% от общемирового⁴. Лидерами в разработке программного обеспечения

для распознавания речи являются компании Nuance Communications, IBM и Philips⁵.

Распознавание речи приобрело всеобщую значимость в медицине в англоязычных странах приблизительно за 45 лет. Оно охватило все уровни здравоохранения — от первичного звена и неотложной помощи до высоко-специализированных отделений. Современные медицинские системы распознавания речи для английского языка обладают точностью до 99%, способны адаптироваться под разные акценты и не требуют предварительного обучения голосовому профилю врача⁶.

СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА РАСПОЗНАВАНИЯ РЕЧИ

Как было сказано ранее, технология распознавания речи строится на процессе перевода устной речи человека в текст с использованием компьютера. В современных системах голосового ввода применяются алгоритмы искусственного интеллекта, которые позволяют значительно повысить качество и скорость распознавания речи пользователя [27]. Процесс распознавания состоит из нескольких этапов, каждый из которых имеет свои особенности (рис. 1).

1. *Получение аудиосигнала.* Первый этап распознавания речи — это запись звуковой волны. Она может быть выполнена с помощью микрофона, встроенного в любое устройство записи аудио, например в смартфон. Затем звуковая волна преобразуется в цифровой формат, чтобы его мог обработать компьютер.
2. *Предварительная обработка аудиосигнала.* На этом этапе полученные звуковые данные проходят предварительную обработку, позволяющую устранить посторонние фоновые шумы и выделить речь пользователя. Это повышает качество распознавания речи.

³ Reaction Data [интернет]. Speech Rec in Radiology-State of the Market. 2019 [cited 2019 Dec 23]. Режим доступа: <https://www.reactiondata.com/report/speech-recognition-in-radiology-state-of-the-market/>.

⁴ Grand View Research [интернет]. Voice And Speech Recognition Market Size Report, 2030. Режим доступа: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/voice-recognition-market>.

⁵ Nuance Communications. Healthcare Clinical Documentation AI Solutions & Services for the NHS (<https://www.nuance.com/en-gb/healthcare.html>); Philips. Healthcare--Philips (<https://www.dictation.philips.com/gb/industries/industry/healthcare-professionals/>); IBM. Watson Speech to Text (<https://www.ibm.com/cloud/watson-speech-to-text>).

⁶ Nuance Communications [интернет]. Dragon Medical One--#1 Clinical Documentation Companion. Режим доступа: <https://www.nuance.com/healthcare/provider-solutions/speech-recognition/dragon-medical-one.html>.

3. *Разделение на фрагменты.* Затем аудиофайл разбивается на небольшие фрагменты длиной около 10–25 миллисекунд. Это необходимо для оптимизации анализа звуковых данных. Каждый фрагмент анализируется системой распознавания речи отдельно.
4. *Извлечение характеристик речи.* На этом этапе вычисляются характеристики речи, такие как частота, продолжительность и амплитуда звуков. Они используются для определения фонем, которые составляют произнесённые слова.
5. *Сопоставление с моделями распознавания.* Сопоставление фонем происходит с помощью акустических моделей, которые обучаются на большом количестве образцов речи. Эти модели могут использовать различные методы, включая скрытые модели Маркова, нейронные сети и другие алгоритмы машинного обучения [28–30].
6. *Составление слов и текста.* На этом этапе языковая модель объединяет фонемы в слова и фразы, а затем в полный текст. Этот текст может потребовать дополнительной обработки для исправления орфографических ошибок и других неточностей.
7. *Вставка сформированного текста.* Это финальный этап. Сформированный текст вставляется в медицинский документ. Учитывая то, что системы распознавания речи ещё не достигли 100% точности, в некоторых случаях врачу приходится вручную вносить коррективы в распознанный текст.

Чтобы система распознала звуки вне зависимости от пола, возраста и интонации диктующего, преобразовала их в буквы с большей точностью, акустические и языковые модели используют модули искусственного интеллекта. Разработчики обучают нейронные сети на наборе данных. При этом набор данных включает в себя большое количество разнообразных аудиозаписей и примеров текста. Когда поступает голосовой сигнал, нейронная сеть «ищет» соответствие в базе данных. В процессе использования нейронная сеть продолжает своё обучение и создаёт новые комбинации пар «звук-буква», что позволяет с большей вероятностью воспроизводить задуманный текст без орфографических ошибок. В процессе обучения компьютер распознаёт наиболее важные признаки произношения фонем и записывает полученные данные в виде профиля пользователя⁷ [31].

В последнее время получили широкое распространение так называемые end-to-end-подходы к построению систем распознавания речи. End-to-end-подходы в технологии распознавания речи представляют собой методы, в которых вся обработка речевого сигнала выполняется автоматически, без необходимости выполнения отдельных этапов обработки, таких как извлечение признаков и создание модели распознавания речи [32].

Одним из наиболее популярных end-to-end-подходов является глубокое обучение (deep learning). В этом случае нейронная сеть обучается напрямую на сырых аудиоданных, без необходимости выполнения предварительной обработки [32]. Другим примером end-to-end-подхода является использование рекуррентных нейронных сетей (recurrent neural network, RNN) или свёрточных нейронных сетей (convolutional neural networks, CNN) для распознавания речи. В этом случае нейронная сеть обучается на входном сигнале и выходном тексте, используя технику обучения с учителем [32].

Преимущество end-to-end-подходов заключается в том, что они могут обеспечить более высокую точность распознавания, поскольку вся информация о речи используется при обучении нейронной сети. Однако эти подходы могут быть более сложными в реализации и требовать большего количества данных для обучения [33].

ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ РАСПОЗНАВАНИЯ РЕЧИ В ЛУЧЕВОЙ ДИАГНОСТИКЕ

Первые системы распознавания речи для русского языка появились в середине 2000-х годов [34, 35], но применение общеразговорного словаря не позволяло использовать их в медицинской практике. Потребовалось ещё несколько лет для разработки систем голосового ввода, позволяющих расшифровывать русскую речь с медицинскими терминами [36]. Активное развитие технологии распознавания речи пришлось лишь на вторую половину 2010-х годов. Такая задержка была связана со сложностями распознавания русской речи.

Русский язык имеет более сложную структуру словообразования по сравнению с английским, так как является синтетическим языком с наличием большого количества словоформ. Чтобы распознавать слова, необходимо использовать словари большего объёма. Это замедляет работоспособность системы [37]. Например, современные системы распознавания речи для английского языка используют словарь, содержащий до 300 тыс. слов и терминов, а для русского языка словарь может содержать более 5 млн слов, словоформ и словосочетаний [33, 38, 39]. Кроме того, большинство словоформ одного и того же слова отличаются только окончаниями, которые часто произносятся пользователями нечётко. Это приводит к ошибке распознавания всей фразы и необходимости корректировки финального документа. В том числе в русском языке имеется больше вариантов расположения слов в предложении в отличие от английского языка, где используются строгие грамматические конструкции. Это затрудняет создание языковых моделей системы распознавания речи и понижает точность их работы.

⁷ Cloud.mts.ru [интернет]. Технология распознавания речи и ее значение для бизнеса. Режим доступа: <https://cloud.mts.ru/cloud-thinking/blog/tehnologiya-raspoznavaniya-rechi/>.

На сегодняшний день в России ведущей компанией по разработке систем голосового ввода для здравоохранения является группа компаний «ЦРТ»⁸. Первое исследование эффективности применения технологии распознавания речи в отделениях лучевой диагностики было проведено в 2020 году на базе семи городских поликлиник Департамента здравоохранения города Москвы с использованием системы голосового ввода «Voice2Med» (группа компаний «ЦРТ») ранней версии с точностью распознавания 93%. В исследовании проводилось сравнение скорости заполнения медицинской документации с помощью клавиатурного ввода и системы распознавания речи. Врачи-рентгенологи заполняли протоколы компьютерных и магнитно-резонансных томографических исследований. Хронометражное исследование продемонстрировало, что средняя длительность, необходимая для описания одного исследования с помощью клавиатурного ввода, составила 10 минут 15 секунд, а при использовании системы распознавания речи — 8 минут 2 секунды. На современном этапе развития точность распознавания медицинской терминологии на русском языке достигла 98%. Это стало возможным благодаря формированию словаря медицинских терминов, разработанного на основе 2,5 млн протоколов рентгенологических исследований, и анализу обратной связи от врачей-рентгенологов⁹ (рис. 2).

Опрос врачей-рентгенологов, проведённый в 2022 году, продемонстрировал, что 62,8% респондентов отмечают повышение эффективности своей работы при использовании системы распознавания речи. Большинство врачей, использующих голосовой ввод в повседневной работе, оценивают качество распознавания



Рис. 2. Рабочее место врача-рентгенолога в Московском референс-центре лучевой диагностики, оснащённое системой распознавания речи. Процесс заполнения медицинской документации.

рентгенологических терминов как хорошее и отличное. Респонденты отмечают, что возникали ситуации, когда распознавалась чужая речь, случалось некорректное распознавание окончаний слов. Выявлено также, что на качество распознавания может негативно влиять посторонний фоновый шум (работа диагностического оборудования, общение медицинского персонала с пациентом или с коллегами) и некачественные устройства для записи звука. Немаловажным фактором, влияющим на приверженность использованию новой технологии, стал возраст врачей и их заинтересованность инновацией. Молодые специалисты более открыты к технологии, также более склонными к применению систем голосового ввода в работе оказались специалисты в возрасте 30–40 лет. Результаты проведённых опросов показали положительную динамику в отношении врачей-рентгенологов к технологии распознавания речи в течение 2 лет с момента начала её применения [40].

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ РАСПОЗНАВАНИЯ РЕЧИ

Дальнейшее улучшение точности распознавания позволит ещё больше сократить время подготовки электронных медицинских документов. Одной из основных задач, стоящих перед разработчиками систем распознавания речи, является обеспечение высокой точности анализа речи в сложных акустических условиях, когда на записи присутствуют множество шумов или голоса посторонних людей. Кроме того, как уже упоминалось, из-за особенностей русского языка одна из сложностей, с которой сталкиваются пользователи, — это распознавание окончаний слов. Поэтому для систем распознавания речи русского языка важнейшей задачей является разработка языковой модели, способной с высокой точностью предсказывать и согласовывать слова в предложениях.

Интеграция программ голосового ввода с медицинскими информационными системами позволит осуществлять дистанционное заполнение структурированных электронных медицинских документов. Развиваясь, система способна не просто распознавать фразы врача, но и понимать, в каком разделе медицинского документа распознанный текст должен быть размещён. Реализация такого функционала позволит врачам ультразвуковой диагностики, патоморфологам, эндоскопистам, хирургам заполнять медицинские документы непосредственно во время выполнения медицинской манипуляции, а не постфактум, что значительным образом скажется на качестве документов и скорости их подготовки.

⁸ Группа компаний ЦРТ [интернет]. Синтез и распознавание речи, запись и анализ, идентификация лица и голоса. Режим доступа: <http://www.speechpro.ru/>.

⁹ Группа компаний ЦРТ [интернет]. Voice2Med: Программа для голосового заполнения медицинской документации. Режим доступа: <https://www.speechpro.ru/product/programmy-dlya-raspoznaniya-rechi-v-tekst/voice2med>.

Технология распознавания речи имеет также большой потенциал в стандартизации и унификации лексики, используемой при подготовке медицинских документов, в том числе рентгенологических протоколов. На сегодняшний день не существует единого универсального списка терминов для описания одного и того же патологического состояния в рентгенологии [41]. Даже два разных врача-рентгенолога, работающих в одном отделении, могут использовать при подготовке протоколов исследования различные синонимы, описывающие одну и ту же патологическую находку. В ряде работ было отмечено, что использование структурированных и стандартизированных протоколов с унифицированной терминологией упрощает восприятие и получение нужной информации как другим врачам-рентгенологам, так и врачам других специальностей [42–44].

На сегодняшний день предпринята попытка разработать тезаурус, который позволил бы стандартизировать описание патологических изменений, выявленных при компьютерных томографических исследованиях. Тезаурус содержит 120 русскоязычных рентгенологических терминов и примеров их описания [45]. Однако разработка тезауруса — это сложная задача, требующая согласования терминологии большим количеством специалистов и рентгенологическим сообществом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В литературном обзоре представлена краткая историческая справка о развитии технологии распознавания речи в отделениях лучевой диагностики, подробно описана её эволюция, а также оценены достоинства и недостатки инновации на основе литературных данных. Особое внимание уделено применению технологии распознавания речи в российских отделениях лучевой диагностики. В некоторых работах продемонстрировано значительное улучшение точности распознавания медицинской терминологии на русском языке. В перспективе её применение способно сокращать длительность подготовки медицинской документации и уделять больше времени общению с пациентом и изучению его истории болезни, что открывает новые возможности для развития персонализированной медицины. Тем не менее всё ещё сохраняются ошибки распознавания окончаний и согласования слов в предложении, что требует от врачей дополнительного времени на их исправление. В дальнейшем эти проблемы будут решены за счёт применения новых алгоритмов искусственного интеллекта.

Результаты некоторых исследований демонстрируют позитивный настрой врачей-рентгенологов по отношению к системам распознавания речи, что проявляется в более частом их использовании в работе. Технология, однозначно, должна продолжать своё развитие в здравоохранении России, так как пилотные отечественные и устоявшиеся зарубежные примеры её внедрения свидетельствуют

о позитивной динамике применения. Дальнейшее повышение точности распознавания медицинских терминов позволит найти ещё больше сторонников технологии распознавания речи среди медицинских специалистов.

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 от 21.12.2022 г. № 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» Департамента здравоохранения города Москвы.

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 научной публикации, поиск и анализ литературных данных, написание текста рукописи; К.А. Бардасова — поиск и анализ научных данных, сбор и подготовка материалов; А.Н. Хоружая — написание и редактирование текста рукописи.

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. Kudryavtsev — concept and design of the paper, text writing, approval of the final version of the paper; K. Bardasova — data collection and analysis; A. Khoruzhaya — data interpretation, text editing.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вечорко В.И. Распределение рабочего времени на амбулаторном приеме врача-терапевта участкового с медицинской сестрой в поликлинике города Москвы (фотохронометражное наблюдение) // Социальные аспекты здоровья населения. 2016. № 6. С. 4.
2. Каплиева О.В., Марега Л.А., Воробьева Л.П. Хронометраж рабочего времени врачей детского консультативно-диагностического отделения // Дальневосточный медицинский журнал. 2018. № 4. С. 72–76.
3. Ryabchikov I.V., Zagafarov R.R., Mukhina V.V., et al. Distribution of the traumatologist-orthopaedician's working time with outpatients // Moscow Sur J. 2018. N 6. P. 38–43. doi: 10.17238/issn2072-3180.2018.6.38-43
4. Kudryavtsev N.D., Sergunova K.A., Ivanova G.V., et al. Evaluation of the effectiveness of the implementation of speech recognition technology for the preparation of radiological protocols // VIT. 2020. Vol. 6, N S1. P. 58–64. doi: 10.37690/1811-0193-2020-S1-58-64
5. Blackley S.V., Huynh J., Wang L., et al. Speech recognition for clinical documentation from 1990 to 2018: A systematic review // J Am Med Inf Association. 2019. Vol. 26, N 4. P. 324–338. doi: 10.1093/jamia/ocy179
6. Motyer R.E., Liddy S., Torreggiani W.C., Buckley O. Frequency and analysis of non-clinical errors made in radiology reports using the National Integrated Medical Imaging System voice recognition dictation software // Ir J Med Sci. 2016. Vol. 185, N 4. P. 921–927. doi: 10.1007/s11845-016-1507-6
7. Hodgson T., Coiera E. Risks and benefits of speech recognition for clinical documentation: A systematic review // J Am Med Inf Association. 2016. Vol. 23, N e1. P. e169–e179. doi: 10.1093/jamia/ocv152
8. Itakura F. Minimum prediction residual principle applied to speech recognition // IEEE Trans Acoust Speech Signal Process. 1975. Vol. 23, N 1. P. 67–72. doi: 10.1109/TASSP.1975.1162641
9. Leeming W., Porter D., Jackson J.D., et al. Computerized radiologic reporting with voice data-entry // Radiology. 1981. Vol. 138, N 3. P. 585–588. doi: 10.1148/radiology.138.3.7465833
10. Simon M., Leeming B.W., Bleich H.L., et al. Computerized radiology reporting using coded language // Radiology. 1974. Vol. 113, N 2. P. 343–349. doi: 10.1148/113.2.343
11. Vogel M., Kaisers W., Wassmuth R., Mayatepek E. Analysis of documentation speed using web-based medical speech recognition technology: Randomized controlled trial // J Med Internet Res. 2015. Vol. 17, N 11. P. e247. doi: 10.2196/jmir.5072
12. Ramaswamy M.R., Chaljub G., Esch O., et al. Continuous speech recognition in MR imaging reporting // Am J Roentgenol. 2000. Vol. 174, N 3. P. 617–622. doi: 10.2214/ajr.174.3.1740617
13. Poder T.G., Fisette J.F., Déry V. Speech recognition for medical dictation: Overview in quebec and systematic review // J Med Systems. 2018. Vol. 42, N 5. P. 89. doi: 10.1007/s10916-018-0947-0
14. Sankaranarayanan B., David G., Vishwanath K.R., et al. Would technology obliterate medical transcription? // Proceedings of the 2017 ACM SIGMIS Conference on Computers and People Research. New York, NY, USA: ACM, 2017. P. 97–104. doi: 10.1145/3084381.3084414
15. Houston J.D., Rupp F.W. Experience with implementation of a radiology speech recognition system // J Digital Imaging. 2000. Vol. 13, N 3. P. 124–128. doi: 10.1007/BF03168385
16. Saxena K., Diamond R., Conant R.F., et al. Provider adoption of speech recognition and its impact on satisfaction, documentation quality, efficiency, and cost in an inpatient EHR // AMIA Jt Summits Transl Sci Proc. 2018. Vol. 2017. P. 186–195.
17. Schwartz L.H., Kijewski P., Hertogen H., et al. Voice recognition in radiology reporting // Am J Roentgenol. 1997. Vol. 169, N 1. P. 27–29. doi: 10.2214/ajr.169.1.9207496
18. Vogel M., Kaisers W., Wassmuth R., Mayatepek E. Analysis of documentation speed using web-based medical speech recognition technology: Randomized controlled trial // J Med Int Research. 2015. Vol. 17, N 11. P. e247. doi: 10.2196/jmir.5072
19. Hammana I., Lepanto L., Poder T., et al. Speech recognition in the radiology department: A systematic review // Health Inf Manag. 2015. Vol. 44, N 2. P. 4–10. doi: 10.1177/183335831504400201
20. Mohr D.N., Turner D.W., Pond G.R., et al. Speech recognition as a transcription aid: A randomized comparison with standard transcription // J Am Med Inf Association. 2003. Vol. 10, N 1. P. 85–93. doi: 10.1197/jamia.m1130
21. Singh M., Pal T.R. Voice recognition technology implementation in surgical pathology: Advantages and limitations // Arch Pathol Laboratory Med. 2011. Vol. 135, N 11. P. 1476–1481. doi: 10.5858/arpa.2010-0714-OA
22. Goss F.R., Blackley S.V., Ortega C.A., et al. A clinician survey of using speech recognition for clinical documentation in the electronic health record // Int J Med Inf. 2019. N 130. P. 103938. doi: 10.1016/j.ijmedinf.2019.07.017
23. Blackley S.V., Schubert V.D., Goss F.R., et al. Physician use of speech recognition versus typing in clinical documentation: A controlled observational study // Int J Med Inform. 2020. N 141. P. 104178. doi: 10.1016/j.ijmedinf.2020.104178
24. Yang L., Ene I.C., Belaghi R.A., et al. Stakeholders' perspectives on the future of artificial intelligence in radiology: A scoping review // Eur Radiol. 2022. Vol. 32, N 3. P. 1477–1495. doi: 10.1007/s00330-021-08214-z
25. European Society of Radiology (ESR). Impact of artificial intelligence on radiology: A EuroAIM survey among members of the European Society of Radiology // Insights Imaging. 2019. Vol. 10, N 1. P. 105. doi: 10.1186/s13244-019-0798-3
26. Szymański P., Żelasko P., Morzyet M., et al. WER we are and WER we think we are // arXiv. arXiv:2010.03432.2020. doi: 10.48550/arXiv.2010.03432
27. Li J. Recent advances in end-to-end automatic speech recognition // arXiv. arXiv:2111.01690.2022. doi: 10.48550/arXiv.2111.01690
28. Juang B.H., Rabiner L.R. Hidden markov models for speech recognition // Technometrics. 1991. Vol. 33, N 3. P. 251–272.
29. Graves A., Mohamed A., Hinton G. Speech recognition with deep recurrent neural networks // 2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2013. P. 6645–6649. doi: 10.48550/arXiv.1303.5778
30. Deng L., Li X. Machine learning paradigms for speech recognition: An overview // IEEE Trans Audio Speech Lang Process. 2013. Vol. 21, N 5. P. 1060–1089.
31. Казачкин А.Е. Методы распознавания речи, современные речевые технологии // Молодой ученый. 2019. № 39. С. 6–8.
32. Kamath U., Liu J., Whitaker J. Deep learning for NLP and speech recognition. Cham: Springer International Publishing, 2019. 621 p.

33. Wang D., Wang X., Lv S. An overview of end-to-end automatic speech recognition // *Symmetry*. 2019. Vol. 11, N 8. P. 1018. doi: 10.3390/sym11081018
34. Zhzhikashvili V.A., Farkhadov M.P., Petukhova N.V., Zhzhikashvili A.V. The first voice recognition applications in Russian language for use in The Interactive Information Systems // *Speech and Computer*. Saint-Petersburg, SPECOM, 2004. P. 304–307.
35. Карпов А.А., Ронжин А.А., Ли И.В. SIRIUS система дикторне-зависимого распознавания слитной русской речи // *Известия Южного федерального университета. Технические науки*. 2005. Т. 54, № 10. С. 44–54.
36. Ирзаев М.Г. Использование голосового ввода информации в медицинских учреждениях для заполнения электронных карт и историй болезней пациентов // *Новые технологии и техника в медицине, биологии и экологии: сборник научных трудов*. 2013. № 3. С. 149–154.
37. Vazhenina D., Markov K., Karpov A., et al. State-of-the-art speech recognition technologies for Russian language // *Proceedings of the 2012 Joint International Conference on Human-Centered Computer Environments*. Aizu-Wakamatsu Japan: ACM, 2012. P. 59–63. doi: 10.1145/2160749.2160763
38. Kamvar M., Chelba C. Optimal size, freshness and time-frame for voice search vocabulary // *arXiv*. arXiv:1210.8436.2012.
39. Kipyatkova I.S., Karpov A.A. An analytical survey of large vocabulary Russian speech recognition systems // *SPIIRAS Proceedings*. 2014. Vol. 1, N 12. P. 7. doi: 10.15622/sp.12.1
40. Kudryavtsev N.D., Semenov D.S., Kozhikhina D.D., Vladzmyrskyy A.V. Speech recognition technology: Results of a survey of radiologists at the Moscow reference center for diagnostic radiology // *Healthcare Management*. 2022. Vol. 8, N 3. P. 95–104. doi: 10.33029/2411-8621-2022-8-3-95-104
41. Синицын В.Е., Комарова М.А., Мершина Е.А. Протокол рентгенологического описания: прошлое, настоящее, будущее // *Вестник рентгенологии и радиологии*. 2014. № 3. С. 35–40.
42. Sobez L.M., Kim S.H., Angstwurm M., et al. Creating high-quality radiology reports in foreign languages through multilingual structured reporting // *Eur Radiol*. 2019. Vol. 29, N 11. P. 6038–6048. doi: 10.1007/s00330-019-06206-8
43. Ganeshan D., Duong P.A., Probyn L., et al. Structured reporting in radiology // *Academic Radiology*. 2018. Vol. 25, N 1. P. 66–73. doi: 10.1016/j.acra.2017.08.005
44. Dos Santos P.D., Hempel J.M., Mildemberger P., et al. Structured reporting in clinical routine // *Rofo*. 2019. Vol. 191, N 01. P. 33–39. doi: 10.1055/a-0636-3851
45. Андрианова М.Г., Кудрявцев Н.Д., Петряйкин А.В. Разработка тезауруса рентгенологических терминов для голосового заполнения протоколов диагностических исследований // *Digital Diagnostics*. 2022. Т. 3, № S1. С. 21–22. doi: 10.17816/DD105703

REFERENCES

1. Vechorko VI. Distribution of working time at an outpatient appointment of a district therapist with a nurse in a polyclinic in Moscow (photochronometric observation). *Social Aspects Public Health*. 2016;(6):4. (In Russ).
2. Kaplieva OV, Marega LA, Vorobyeva LP. Timekeeping of working hours of doctors of the children's consultative and diagnostic department. *Far Eastern Med J*. 2018;(4):72–76. (In Russ).
3. Ryabchikov IV, Zagafarov RR, Mukhina VV, et al. Distribution of the traumatologist-orthopaedician's working time with outpatients. *Moscow Sur J*. 2018;(6):38–43. (In Russ). doi: 10.17238/issn2072-3180.2018.6.38-43
4. Kudryavtsev ND, Sergunova KA, Ivanova GV, et al. Evaluation of the effectiveness of the implementation of speech recognition technology for the preparation of radiological protocols. *VIT*. 2020;6(S1):58–64. (In Russ). doi: 10.37690/1811-0193-2020-S1-58-64
5. Blackley SV, Huynh J, Wang L, et al. Speech recognition for clinical documentation from 1990 to 2018: A systematic review. *J Am Med Inf Association*. 2019;26(4):324–338. doi: 10.1093/jamia/ocy179
6. Motyer RE, Liddy S, Torreggiani WC, Buckley O. Frequency and analysis of non-clinical errors made in radiology reports using the National Integrated Medical Imaging System voice recognition dictation software. *Ir J Med Sci*. 2016;185(4):921–927. doi: 10.1007/s11845-016-1507-6
7. Hodgson T, Coiera E. Risks and benefits of speech recognition for clinical documentation: A systematic review. *J Am Med Inf Association*. 2016;23(e1):e169–e179. doi: 10.1093/jamia/ocv152
8. Itakura F. Minimum prediction residual principle applied to speech recognition. *IEEE Trans Acoust Speech Signal Process*. 1975;23(1):67–72. doi: 10.1109/TASSP.1975.1162641
9. Leeming W, Porter D, Jackson JD, et al. Computerized radiologic reporting with voice data-entry. *Radiology*. 1981;138(3):585–588. doi: 10.1148/radiology.138.3.7465833
10. Simon M, Leeming BW, Bleich HL, et al. Computerized radiology reporting using coded language. *Radiology*. 1974;113(2):343–349. doi: 10.1148/113.2.343
11. Vogel M, Kaisers W, Wassmuth R, Mayatepek E. Analysis of documentation speed using web-based medical speech recognition technology: Randomized controlled trial. *J Med Internet Res*. 2015;17(11):e247. doi: 10.2196/jmir.5072
12. Ramaswamy MR, Chaljub G, Esch O, et al. Continuous speech recognition in MR imaging reporting. *Am J Roentgenol*. 2000;174(3):617–622. doi: 10.2214/ajr.174.3.1740617
13. Poder TG, Fisetite JF, Déry V. Speech recognition for medical dictation: Overview in quebec and systematic review. *J Med Systems*. 2018;42(5):89. doi: 10.1007/s10916-018-0947-0
14. Sankaranarayanan B, David G, Vishwanath KR, et al. Would technology obliterate medical transcription? In: *Proceedings of the 2017 ACM SIGMIS Conference on Computers and People Research*. New York, NY, USA: ACM; 2017. P. 97–104. doi: 10.1145/3084381.3084414
15. Houston JD, Rupp FW. Experience with implementation of a radiology speech recognition system. *J Digital Imaging*. 2000;13(3):124–128. doi: 10.1007/BF03168385
16. Saxena K, Diamond R, Conant RF, et al. Provider adoption of speech recognition and its impact on satisfaction, documentation quality, efficiency, and cost in an inpatient EHR. *AMIA Jt Summits Transl Sci Proc*. 2018;2017:186–195.
17. Schwartz LH, Kijewski P, Hertogen H, et al. Voice recognition in radiology reporting. *Am J Roentgenol*. 1997;169(1):27–29. doi: 10.2214/ajr.169.1.9207496
18. Vogel M, Kaisers W, Wassmuth R, Mayatepek E. Analysis of documentation speed using web-based medical speech recognition technology: Randomized controlled trial. *J Med Int Research*. 2015;17(11):e247. doi: 10.2196/jmir.5072

19. Hammana I, Lepanto L, Poder T, et al. Speech recognition in the radiology department: A systematic review. *Health Inf Manag.* 2015;44(2):4–10. doi: 10.1177/183335831504400201
20. Mohr DN, Turner DW, Pond GR, et al. speech recognition as a transcription aid: A randomized comparison with standard transcription. *J Am Med Inf Association.* 2003;10(1):85–93. doi: 10.1197/jamia.m1130
21. Singh M, Pal TR. Voice recognition technology implementation in surgical pathology: Advantages and limitations. *Arch Pathol Laboratory Med.* 2011;135(11):1476–1481. doi: 10.5858/arpa.2010-0714-OA
22. Goss FR, Blackley SV, Ortega CA, et al. A clinician survey of using speech recognition for clinical documentation in the electronic health record. *Int J Med Inf.* 2019;(130):103938. doi: 10.1016/j.ijmedinf.2019.07.017
23. Blackley SV, Schubert VD, Goss FR, et al. Physician use of speech recognition versus typing in clinical documentation: A controlled observational study. *Int J Med Inform.* 2020;(141):104178. doi: 10.1016/j.ijmedinf.2020.104178
24. Yang L, Ene IC, Belaghi RA, et al. Stakeholders' perspectives on the future of artificial intelligence in radiology: A scoping review. *Eur Radiol.* 2022;32(3):1477–1495. doi: 10.1007/s00330-021-08214-z
25. European Society of Radiology (ESR). Impact of artificial intelligence on radiology: A EuroAIM survey among members of the European Society of Radiology. *Insights Imaging.* 2019;10(1):105. doi: 10.1186/s13244-019-0798-3
26. Szymański P, Żelasko P, Morzyet M, et al. WER we are and WER we think we are. *arXiv.* arXiv:2010.03432.2020. doi: 10.48550/arXiv.2010.03432
27. Li J. Recent advances in end-to-end automatic speech recognition. *arXiv.* arXiv:2111.01690.2022. doi: 10.48550/arXiv.2111.01690
28. Juang BH, Rabiner LR. Hidden markov models for speech recognition. *Technometrics.* 1991;33(3):251–272.
29. Graves A, Mohamed A, Hinton G. Speech recognition with deep recurrent neural networks In: 2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Vancouver, BC, Canada: IEEE; 2013. P. 6645–6649. doi: 10.48550/arXiv.1303.5778
30. Deng L, Li X. Machine learning paradigms for speech recognition: An overview. *IEEE Trans Audio Speech Lang Process.* 2013;21(5):1060–1089.
31. Kazachkin AE. Speech recognition methods, modern speech technologies. *Young Scientist.* 2019;(39):6–8. (In Russ).
32. Kamath U, Liu J, Whitaker J. Deep learning for NLP and speech recognition. Cham: Springer International Publishing; 2019. 621 p.
33. Wang D, Wang X, Lv S. An overview of end-to-end automatic speech recognition. *Symmetry.* 2019;11(8):1018. doi: 10.3390/sym11081018
34. Zhzhikashvili VA, Farkhadov MP, Petukhova NV, Zhzhikashvili AV. The first voice recognition applications in Russian language for use in The Interactive Information Systems. In: Speech and Computer. Saint-Petersburg, SPECOM; 2004. P. 304–307. (In Russ).
35. Karpov AA, Ronzhin AA, Li IV. SIRIUS system of dictoron-independent recognition of the merged Russian speech. *Izvestia Southern Federal University. Technical Sci.* 2005;54(10):44–54. (In Russ).
36. Irzaev MG. The use of voice input of information in medical institutions to fill in electronic charts and patient medical histories. *New technologies and techniques in medicine, biology and ecology: Collection of scientific papers.* 2013;(3):149–154. (In Russ).
37. Vazhenina D, Markov K, Karpov A, et al. State-of-the-art speech recognition technologies for Russian language. In: Proceedings of the 2012 Joint International Conference on Human-Centered Computer Environments. Aizu-Wakamatsu Japan: ACM; 2012. P. 59–63. doi: 10.1145/2160749.2160763
38. Kamvar M, Chelba C. Optimal size, freshness and time-frame for voice search vocabulary. *arXiv.* arXiv:1210.8436.2012.
39. Kipyatkova IS, Karpov AA. An analytical survey of large vocabulary Russian speech recognition systems. *SPIIRAS Proceedings.* 2014;1(12):7. (In Russ). doi: 10.15622/sp.12.1
40. Kudryavtsev ND, Semenov DS, Kozhikhina DD, Vladzmyrskyy AV. Speech recognition technology: Results of a survey of radiologists at the Moscow reference center for diagnostic radiology. *Healthcare Management.* 2022;8(3):95–104. (In Russ). doi: 10.33029/2411-8621-2022-8-3-95-104
41. Sinityn VE, Komarova MA, Mershina EA. Protocol of radiological description: Past, present, future. *Bulletin Radiology Radiology.* 2014;(3):35–40. (In Russ).
42. Sobez LM, Kim SH, Angstwurm M, et al. Creating high-quality radiology reports in foreign languages through multilingual structured reporting. *Eur Radiol.* 2019;29(11):6038–6048. doi: 10.1007/s00330-019-06206-8
43. Ganeshan D, Duong PA, Probyn L, et al. Structured reporting in radiology. *Academic Radiology.* 2018;25(1):66–73. doi: 10.1016/j.acra.2017.08.005
44. Dos Santos PD, Hempel JM, Mildenerger P, et al. Structured reporting in clinical routine. *Rofo.* 2019. Vol. 191, N 01. P. 33–39. doi: 10.1055/a-0636-3851
45. Andrianova MG, Kudryavtsev ND, Petryaykin AV. Development of a thesaurus of radiological terms for voice filling of diagnostic research protocols. *Digital Diagnostics.* 2022;3(S1):21–22. (In Russ). doi: 10.17816/DD105703

ОБ АВТОРАХ

* Кудрявцев Никита Дмитриевич;

адрес: Россия, 127051, Москва, ул. Петровка, д. 24, стр. 1;
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4203-0630>;
eLibrary SPIN: 1125-8637; e-mail: KudryavtsevND@zdrav.mos.ru

Бардасова Кристина Алексеевна;

ORCID: <http://orcid.org/0009-0002-4310-1357>;
eLibrary SPIN: 1156-7627; e-mail: bardasovakris@mail.ru

Хоружая Анна Николаевна;

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4857-5404>;
eLibrary SPIN: 7948-6427; e-mail: KhoruzhayaAN@zdrav.mos.ru

AUTHORS' INFO

* Nikita D. Kudryavtsev;

address: 24/1 Petrovka street, 127051 Moscow, Russia;
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4203-0630>;
eLibrary SPIN: 1125-8637; e-mail: KudryavtsevND@zdrav.mos.ru

Kristina A. Bardasova;

ORCID: <http://orcid.org/0009-0002-4310-1357>;
eLibrary SPIN: 1156-7627; e-mail: bardasovakris@mail.ru

Anna N. Khoruzhaya;

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4857-5404>;
eLibrary SPIN: 7948-6427; e-mail: KhoruzhayaAN@zdrav.mos.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD322758>

Роль двухэнергетической компьютерной томографии в диагностике подагры и других кристаллических артропатий: обзор литературы

М.В. Онойко, Е.А. Мершина, О.А. Георгинова, М.Л. Плотникова,
А.В. Панюкова, В.Е. Сеницын

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

АННОТАЦИЯ

В статье обсуждается принцип работы двухэнергетической компьютерной томографии, её диагностическая точность, наиболее часто встречаемые виды артефактов. Рассматривается возможная зависимость наличия депозитов моноурата натрия при выполнении двухэнергетической компьютерной томографии от других клинических данных, значение двухэнергетической компьютерной томографии в диагностике подагры, её роль в дифференциальной диагностике кристаллических артропатий.

Метод двухэнергетической компьютерной томографии имеет ряд преимуществ по сравнению с диагностическим артроцентезом, являющимся золотым стандартом в диагностике подагры: неинвазивность, скорость выполнения, многократное снижение риска ятрогенных осложнений. Выявление подагры, контроль эффективности лечения, возможность проведения дифференциальной диагностики — все эти задачи могут реализоваться с помощью двухэнергетической компьютерной томографии.

Ключевые слова: двухэнергетическая компьютерная томография; ДЭКТ; подагра; пирофосфат кальция; кристаллические артропатии; диагностическая визуализация.

Как цитировать

Онойко М.В., Мершина Е.А., Георгинова О.А., Плотникова М.Л., Панюкова А.В., Сеницын В.Е. Роль двухэнергетической компьютерной томографии в диагностике подагры и других кристаллических артропатий: обзор литературы // *Digital Diagnostics*. 2023. Т. 4, № 2. С. 197–213. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD322758>

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD322758>

The role of dual-energy computed tomography in the diagnosis of gout and other crystalline arthropathies: A review

Maria V. Onoyko, Elena A. Mershina, Olga A. Georginova, Maria L. Plotnikova, Aleksandra V. Panyukova, Valentin E. Sinitsyn

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

The importance of dual-energy computed tomography in the diagnosis of gout, the principles of dual-energy computed tomography, the accuracy of the methodology, and the types of artifacts are discussed in this study. The possible dependence of the presence of deposits of sodium monourate on other clinical data and the role of dual-energy computed tomography in the differential diagnosis of other crystalline arthropathies are considered.

The dual-energy computed tomography has several advantages, including noninvasiveness, speed of execution, and a significant reduction in the risk of iatrogenic consequences compared with diagnostic arthrocentesis, which is the gold standard in diagnosing gout. Dual-energy computed tomography can accomplish gout detection, treatment, and differential diagnosis.

Keywords: calcium pyrophosphate, crystal arthropathies, diagnostic imaging, dual-energy computed tomography, gout

To cite this article

Onoyko MV, Mershina EA, Georginova OA, Plotnikova ML, Panyukova AV, Sinitsyn VE. The role of dual-energy computed tomography in the diagnosis of gout and other crystalline arthropathies: A review. *Digital Diagnostics*. 2023;4(2):197–213. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD322758>

Received: 08.04.2023

Accepted: 11.05.2023

Published: 27.05.2023

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD322758>

双能量计算机断层扫描在诊断痛风和其他结晶性关节病中的作用：文献综述

Maria V. Onoyko, Elena A. Mershina, Olga A. GeorGINOVA, Maria L. Plotnikova, Aleksandra V. Panyukova, Valentin E. Sinitsyn

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

简评

本文讨论了双能量计算机断层扫描的操作原理、其诊断准确性以及最常见的伪影类型。考虑了在双能量计算机断层扫描过程中，单钠尿酸盐沉积的存在对其他临床数据的可能依赖性，双能量计算机断层扫描在诊断痛风中的意义以及其在结晶性关节病的鉴别诊断中的作用。

与作为诊断痛风金标准的诊断性关节穿刺术相比，双能量计算机断层扫描有几个优点：无创性、执行速度、医源性并发症风险的多次减少。痛风的检测、治疗效果的监测、鉴别诊断的可能性，都是可以通过双能量计算机断层扫描来实现的。

关键词：双能量计算机断层扫描；DECT；痛风；焦磷酸钙盐；结晶性关节病；诊断成像。

To cite this article

Onoyko MV, Mershina EA, GeorGINOVA OA, Plotnikova ML, Panyukova AV, Sinitsyn VE. 双能量计算机断层扫描在诊断痛风和其他结晶性关节病中的作用：文献综述. *Digital Diagnostics*. 2023;4(2):197–213. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD322758>

收到: 08.04.2023

接受: 11.05.2023

发布日期: 27.05.2023

ВВЕДЕНИЕ

Подагра — системное ревматологическое заболевание, при котором в результате повышения уровня мочевой кислоты (гиперурикемии) в сыворотке крови происходит отложение кристаллов моноурата натрия в суставной, костной, хрящевой или мягких тканях, и в зависимости от типа поражения могут развиваться как подагрический артрит, так и подагрическая нефропатия или уратный нефролитиаз.

ПОДАГРА: СИСТЕМНОЕ ТОФУСНОЕ ЗАБОЛЕВАНИЕ

В последнее десятилетие накоплено большое количество данных, позволяющих относиться к гиперурикемии не только как к маркеру подагры и мочекаменной болезни. Известно, что гиперурикемия играет определённую роль в возникновении и развитии ряда метаболических и гемодинамических заболеваний, в том числе метаболического синдрома, хронической сердечной недостаточности, гипертонии, атеросклероза, ранних инфарктов и инсультов, сахарного диабета.

Для диагностики подагры используются классификационные критерии Американской (American College of Rheumatology, ACR) и Европейской (European Alliance of Associations for Rheumatology, EULAR) ассоциаций ревматологов (2015 г.), включающие как клинические, так лабораторные и инструментальные критерии [1]. Чувствительность и специфичность разработанных критериев составляет 92% и 89% соответственно [1].

Применение данных критериев возможно, если у пациента имеется «входной признак»: как минимум 1 приступ болезненности и отёчности периферического сустава или суставной сумки. Достаточным критерием для установки диагноза «Подагра» является определение при поляризационной микроскопии в синовиальной жидкости или тофусной ткани (макроскопические конгломераты моноурата натрия, окружённые гранулематозным воспалением) кристаллов моноурата натрия, что позволяет считать данный метод золотым стандартом. В случае отсутствия достаточного критерия необходимо переходить к клиническим (типичные клинические симптомы подагры, обнаружение тофусов, временная характеристика приступа), лабораторным (сывороточный уровень мочевой кислоты, анализ суставной жидкости) и инструментальным методам диагностики (ультразвуковое исследование поражённого сустава, двухэнергетическая компьютерная томография) [1]. Каждому из критериев в зависимости от степени специфичности присваивается определённое количество баллов. Согласно классификационным критериям ACR/EULAR-2015, визуальное определение признаков депозитов уратов при проведении двухэнергетической компьютерной томографии (ДЭКТ) оценивается в 4 балла; для верификации диагноза «Подагра» достаточно 8 из 23

баллов. Таким образом, ДЭКТ — это достаточно весомая часть в верификации диагноза.

Пункция сустава с аспирацией суставной жидкости является инвазивным и болезненным методом, сопряжённым с рядом ограничений и осложнений, что требует поиска дополнительных методов диагностики для установки достоверного диагноза [2, 3]. Одним из альтернативных диагностических инструментов может быть ДЭКТ — неинвазивный метод, при котором уратные отложения могут быть отделены от окружающих тканей с высокой степенью чувствительности и специфичности [4].

Гиперурикемия, кристаллы моноурата натрия

Подагра — системное тофусное заболевание, которое характеризуется отложением в различных тканях кристаллов моноурата натрия, в связи с чем развивается воспаление у лиц с гиперурикемией, обусловленной внешнесредовыми и/или генетическими факторами [5].

Вне зависимости от наследственной предрасположенности подагру необходимо рассматривать как стадийно протекающее заболевание [6], где отправной точкой является гиперурикемия — клиническое состояние, при котором уровень мочевой кислоты в сыворотке крови увеличивается выше 420 мкмоль/л или выше 6 мг/дл и происходит образование кристаллов моноурата натрия [7].

Согласно клинико-лабораторным и инструментальным данным, в течение подагры выделяют четыре последовательные стадии, которые, однако, не всегда переходят из одной в другую: (а) гиперурикемия без симптомов или анамнеза подагры и с отсутствием депозитов кристаллов уратов; (б) бессимптомная гиперурикемия с признаками депозитов кристаллов уратов; (в) гиперурикемия с текущим или предшествующим эпизодом подагрического артрита; (г) гиперурикемия с наличием тофусов, хроническим артритом, эрозивным артритом [5].

При отсутствии адекватной уратснижающей терапии наблюдается прогрессирование заболевания. Вначале происходит формирование конгломератов кристаллов моноурата натрия, которое наблюдается в определённых тканях и зависит от условий окружающей среды. Растворимость моноурата натрия в физиологическом растворе при 37°C составляет 7 мг/дл (416 мкмоль/л), при повышении концентрации моноурата натрия в синовиальной жидкости наблюдается последующее её осаждение на поверхности хряща с дальнейшим его разрушением и проникновением кристаллов моноурата натрия в субхондральную кость [8], что, в конечном итоге, приводит к активному костному ремоделированию. Длительное насыщение синовиальной жидкости кристаллами моноурата натрия приводит к образованию макроскопических отложений моноурата натрия, окружённых гранулематозным воспалением — тофусами [9]. Чаще всего они обнаруживаются в тканях, богатых протеогликанами (капсула сустава, трубчатые кости, сухожилия и кожа), но могут (относительно редко) встречаться и в тканях

паренхиматозных органов. Реакция ткани на отложение моноурата натрия носит характер хронической воспалительной реакции, в которой участвуют как врождённый, так и адаптивный иммунитет [10].

В случае развития хронической подагры увеличиваются частота, продолжительность и тяжесть приступов, происходит формирование тофусов, тяжёлых деформирующих артропатий, наблюдается прогрессирование коморбидной патологии.

Распространённость гиперурикемии, согласно последним эпидемиологическим исследованиям, постепенно увеличивается среди взрослого населения. Так, в Европе и Америке повышенный уровень мочевой кислоты встречается в 0,68–3,9% случаев, а в некоторых частях Китая имеет диапазон от 6,4 до 21,04% [11]. В России данный показатель составляет 16,8% [7], при этом у 5–8% населения гиперурикемия долгое время может протекать бессимптомно. Известно, что гиперурикемия повышает риск развития хронической болезни почек, ожирения, сахарного диабета 2-го типа, сердечно-сосудистого риска и смерти [12, 13].

Методы диагностики подагры

Для установки диагноза «Подагра» необходимо наличие хотя бы одного эпизода артрита сустава (первый плюснефаланговый сустав, голеностопный сустав или средний отдел стопы) или воспаления синовиальной сумки. Вторым достаточным критерием для установки диагноза является определение уровня мочевой кислоты в сыворотке крови и анализ синовиальной жидкости воспалённого сустава или аспират тофуса для определения кристаллов моноурата натрия с использованием поляризационной световой микроскопии [14]. Пункцировать суставы в диагностических целях можно как в острый, так и в межприступный период, однако необходимо помнить, что обработка, длительное хранение синовиальной жидкости, применение уратснижающей терапии в некоторых случаях могут повлиять на достоверность анализа и чувствительность метода обнаружения моноурата натрия [15]. Уровень мочевой кислоты в сыворотке крови повышается периодически у всех пациентов с подагрой, но у 30% больных гиперурикемией не диагностируется даже в период острого подагрического приступа [16], в связи с чем диагноз подагры не следует ставить на основании только уровня мочевой кислоты в сыворотке. У пациентов с нетипичным клиническим течением воспалительной артропатии с целью дифференциальной диагностики, в том числе в отсутствие возможности проведения поляризационной микроскопии синовиальной жидкости, рекомендуется использовать различные методы визуализации для диагностики подагры: рентгенографию, ультразвуковую диагностику и ДЭКТ.

Типичными рентгенологическими признаками подагры являются костные эрозии в виде «пробойников» со склеротическими контурами и нависающими краями,



Рис. 1. Костные эрозии у пациента с диагнозом подагры (данные рентгенологического исследования МНОЦ МГУ).

иногда называемыми эрозиями по типу «крысиного укуса» или «крыла чайки» (рис. 1).

При хронической подагре можно выявить суставные тофусы, выглядящие как неоднородные уплотнения мягких тканей. Рентгенологические изменения определяются спустя несколько лет от дебюта подагры и могут быть полезными в верификации диагноза на более поздних стадиях болезни [16, 17].

ДВУХЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ ТОМОГРАФИЯ: АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ МЕТОД ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ ПОДАГРЫ

Альтернативным методом инструментальной диагностики подагры являются ультразвуковое исследование суставов и ДЭКТ, позволяющие определить отложение уратов, тофусы и эрозию кости.

При ультразвуковом исследовании сустава депозиты уратов могут быть выявлены на поверхности суставного хряща в виде гиперэхогенной прерывистой полоски, не зависящей от угла осмотра (эффект двойного контура); или в суставной жидкости в виде плавающих гиперэхогенных гетерогенных очагов, имеющих вид «снежной бури», а также в виде гиперэхогенных агрегатов, визуализируемых в суставном пространстве или вдоль сухожилий [18].

ДЭКТ имеет преимущество при проведении дифференциальной диагностики, например, между подагрой и септическим артритом или накоплением моноурата натрия и отложением пирофосфата кальция (псевдоподагра, хондрокальциноз) [19, 20]. ДЭКТ позволяет подробно исследовать различные анатомические области,

неинвазивно выявляя в них отложения кристаллов моноурата натрия [21–23].

Принцип работы двухэнергетической компьютерной томографии

ДЭКТ представляет собой современный и весьма перспективный метод исследования, заключающийся в спектральной дифференцировке материалов с помощью сканирования определённого участка тела двумя разными типами рентгеновского излучения, отличающимися по энергии. В таких условиях вещества имеют различные коэффициенты поглощения сигнала, что позволяет отличить их по химическому составу. При низком напряжении в рентгеновской трубке (20–50 кВ) рентгеновское излучение полностью поглощается веществом (преобладает фотоэлектрический эффект), а при высоком (50–150 кВ) — преобладает комптоновское рассеивание, что ведёт к ослаблению сигнала [24, 25]. Вклад фотоэлектрических и комптоновских эффектов для каждого соединения определяется электронной плотностью вещества и атомным номером [24, 26]: чем выше атомный номер и чем ниже электронная плотность (например, йод, кальций, барий, ксенон), тем большее влияние оказывает фотоэлектрическое поглощение, а элементы с малым атомным номером, где электронная плотность выше (углерод, азот, водород, кислород), зависят в большей степени от эффекта Комптона [24]. Так, у таких элементов, как йод, кальций, барий, наблюдается появление K-edge — спайка сигнала, характеризующего процесс поглощения фотона и выброса фотоэлектрона с K-оболочки. Именно этот феномен лежит в основе ДЭКТ. Благодаря наличию чётко выраженных K-edge у некоторых элементов увеличивается разница между величинами коэффициентов поглощения у исследуемых веществ при разных энергиях, что делает возможным их дифференцировку.

Существует несколько разновидностей ДЭКТ: с двумя перпендикулярно расположенными источниками и детекторами; с одной системой источник–детектор, в которой происходит быстрое переключение напряжения; набор из одного источника рентгеновского излучения и многослойного sandwich-детектора [26]. Обработка данных происходит с помощью методов трёхматериальной (three-material decomposition analysis) или двухматериальной (two-material decomposition analysis) декомпозиции. В случае применяемого в программе для диагностики подагры метода двухматериальной декомпозиции разложение производят по двум составляющим — мочевой кислоте и кальцию. Мягкие ткани являются «точкой отсчёта», относительно которой алгоритмом будет приниматься решение о наличии кальция либо моноурата натрия в исследуемой области. В результате появляется возможность построить карту по материальной плотности (material density map, MD-карта), на которой каждому компоненту присваивается

цветовая кодировка. В варианте ДЭКТ-систем производства Siemens кортикальная кость будет иметь синий цвет, губчатая кость — розовый, а кристаллы моноурата натрия — зелёный. В программах обработки других производителей могут использоваться иные цветовые шкалы.

Помимо качественной возможно проведение количественной оценки интересующего химического вещества. В программе Dual Energy Gout автоматически производится вычисление суммарного объёма депозитов моноурата натрия в поле обзора [23]. Необходимо учесть, что в суммарный объём включаются артефакты, поэтому знание об их типах и возможной локализации крайне важно. Используя инструмент обрезки, можно удалить участки зелёного цвета, соответствующие артефактам. Суммарный объём депозитов моноурата натрия будет автоматически пересчитан после выполнения данной операции.

Стоит отметить, что можно выполнять трёхмерную реконструкцию (Volume Rendering Technique, VRT image) с цветовой кодировкой и использовать другие алгоритмы реконструкции, применяемые в исследованиях с иными целями (рис. 2).

Основным преимуществом ДЭКТ по сравнению с другими методами диагностики является возможность определения химического состава объекта путём сканирования на двух энергетических уровнях, количественной оценки интересующего химического вещества. Неинвазивность, быстрота исследования, отсутствие ятрогенных осложнений — всё это неоспоримые достоинства ДЭКТ.

Существует ошибочное мнение, что лучевая нагрузка, которую получает пациент при сканировании двумя энергиями, в 2 раза превышает нагрузку, получаемую при сканировании одной энергией. Однако, согласно результатам многочисленных исследований, лучевая нагрузка и качество изображений при выполнении ДЭКТ и одноэнергетической компьютерной томографии сопоставимы [27–29]. Это достигается не только вследствие технических особенностей аппарата, но и благодаря применению методов, снижающих дозу облучения, к которым относят возможность независимой установки силы тока, итеративную реконструкцию и другие современные алгоритмы, использование VNC-изображений (Virtual Non-Contrast image), ограничение размеров FOV (field of view) областью интереса и др. [30, 31].

Благодаря ДЭКТ можно произвести реконструкцию виртуальных монохроматических изображений (Virtual Monochromatic Image, VMC image), которые представляют собой продукт теоретического сканирования с применением монохроматического излучения. Данная программа помогает повысить контрастность, снизить количество артефактов от металлических конструкций [32].

К недостаткам можно отнести маленькое поле обзора (FOV, field of view) для двухэнергетических изображений,



Рис. 2. Трёхмерная реконструкция, смешанное изображение и изображение с цветовой кодировкой (область правого голеностопного сустава и мелких суставов стопы): синий цвет — кортикальная кость; розовый — губчатая кость; зелёный — кристаллы моноурата натрия (данные двухэнергетической компьютерной томографии МНОЦ МГУ).

которое представляет собой окружность всего 33–35 см в диаметре для разных поколений томографов, возможность ложноположительных и ложноотрицательных результатов, перекрёстное рассеивание (когда фотоны, испускаемые одним источником, попадают в детектор, предназначенный для фотонов другого источника) [33, 34]. Указанные технические несовершенства могут привести к потере данных (рис. 3, *a*).

Диагностическая точность двухэнергетической компьютерной томографии

Согласно результатам А.Н. Ваег и соавт. [35], чувствительность ДЭКТ при тофусной форме подагры составляет 100%, а при отсутствии тофусов — 64%. Чувствительность и специфичность ДЭКТ, по результатам метаанализа

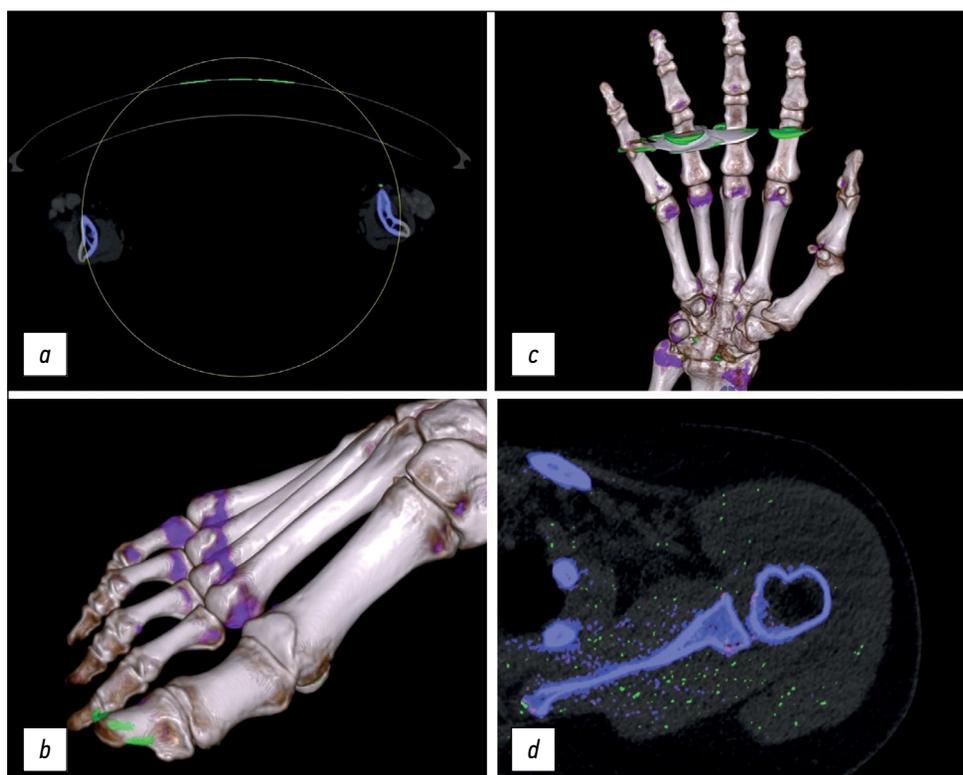


Рис. 3. Артефакты при выполнении двухэнергетической компьютерной томографии: *a* — потеря данных по причине неправильной укладки пациента; *b* — артефакт от ногтевого ложа; *c* — артефакт увеличения жёсткости излучения от облучательного кольца; *d* — множественные мелкоточечные артефакты (данные двухэнергетической компьютерной томографии МНОЦ МГУ).

А. Ogdie и соавт. [20], составляют 87% и 84% соответственно, что превышает эти же параметры для ультразвукового исследования. В работе Т. Bongartz и соавт. [36] чувствительность и специфичность были оценены как 90% и 83% соответственно. Если обратиться к результатам исследования А. Huppertz и соавт. [37], то ДЭКТ оказывается менее чувствительным методом, чем ультразвуковое исследование (100% в сравнении с 84,6%), ввиду более низкой разрешающей способности.

Из вышеуказанных данных следует, что методика ДЭКТ в целом обладает высокой диагностической точностью. Различие результатов у разных исследовательских групп, вероятно, можно объяснить различными областями сканирования, что может иметь значение в определении точности метода, а также различной продолжительностью заболевания у пациентов в некоторых работах [38].

Тем не менее, как и в любом другом методе исследования, наличие ложноположительных и ложноотрицательных результатов неизбежно. Обнаружение объектов, имитирующих кристаллы моноурата натрия, возможно в области ногтевого ложа, кожных мозолей (см. рис. 3, *b*). Данный ложноположительный результат связан с тем, что двухэнергетический индекс (dual-energy index) кератина совпадает с таковым у моноурата натрия, что на исследовании проявляется одинаковой цветовой кодировкой [39]. Интересно отметить, что наличие данных артефактов более характерно для области стоп, чем кистей рук [39, 40]. Кожа над коленными и локтевыми суставами, как правило, не даёт подобных артефактов.

Металлические конструкции, плотные участки кортикальной кости создают артефакты увеличения жёсткости излучения, которые можно принять за депозиты моноурата натрия [40]. Дело в том, что в случае использования полихроматического излучения происходит увеличение жёсткости излучения (beam hardening), в результате чего фотоны с низкой энергией поглощаются быстрее, а с высокой энергией — медленнее, что приводит к увеличению общей энергии рентгеновского излучения. Поскольку пучок становится жёстче, ослабление излучения уменьшается, и интенсивность на детекторах растёт, поэтому регистрируемый профиль поглощения будет отличаться от идеального. Таким образом, артефакт проявляется на изображении в виде впадин и тёмных полос между плотными объектами (см. рис. 3, *c*).

При низком соотношении сигнал/шум (SNR, signal-to-noise ratio) наблюдается появление мелких точечных вкраплений зелёного цвета, мимикрирующих под кристаллы моноурата натрия (см. рис. 3, *d*), тем не менее необходимо рассмотреть случай истинного отложения моноурата натрия, если зелёные мелкоочаговые очаги наблюдаются вдоль какой-либо анатомической структуры, например вдоль ахиллова сухожилия [39].

Ложноотрицательный результат возможен при наличии микрокристаллов моноурата натрия менее 2 мм в диаметре, при визуализации тофусов, в которых концентрация

моноурата натрия слишком мала, а также при неверной установке технических параметров. Однако артефакты достаточно типичны и в большинстве случаев хорошо распознаются опытным рентгенологом. Существуют способы устранения артефактов, в частности использование различных алгоритмов реконструкции изображений, например кернель, и верная настройка параметров изображения на рабочей станции, таких как «Air Distance», «Resolution», «Minimum [HU]», «Ratio» (для программного обеспечения Syngo.via VB20A_HF06 класса Dual Energy Gout).

Кернель (фильтр реконструкции) — это математический алгоритм реконструкции компьютерно-томографических изображений [41].

Использование параметра «Air Distance» (расстояние от кристаллов моноурата натрия до воздуха и кости, измеряемое в вокселях) позволяет уменьшить артефакты в области ногтевого ложа и кожи. В результате данной операции все элементы зелёного цвета будут удалены в пределах заданного значения от поверхности кожи, за исключением тех, которые находятся в то же время рядом с костными структурами на расстоянии не более установленного значения.

Параметр «Ratio» представляет собой двухэнергетическое отношение (dual energy ratio), равное отношению плотности материала в единицах Хаундсфилд (HU) на низкой энергии к плотности материала на высокой энергии. Этот параметр крайне важен для отличия кальция от уратов при обработке данных с помощью метода двухматериальной декомпозиции. Увеличение значения «Ratio» ведёт к повышению чувствительности ДЭКТ-исследования по отношению к кристаллам моноурата натрия за счёт снижения его специфичности [39].

Параметр «Minimum [HU]» устанавливает пороговый уровень единиц Хаундсфилд на смешанных изображениях (mixed images), которые, по сути своей, эквивалентны изображениям, полученным при сканировании с напряжением 120 кВ [42]. Для объектов с плотностью меньше заданного значения двухэнергетический индекс рассчитан не будет, им автоматически присваивается значение «0» HU на MD-картах, и, следовательно, для них не будет определена цветовая кодировка [39].

Показатель «Resolution» определяет минимальное число пикселей зелёного цвета, которое будет приниматься программой за отложение моноурата натрия. Если количество таких пикселей в данной области меньше установленного значения, то визуализироваться они не будут.

Наличие дополнительного оловянного фильтра позволяет отсеять фотоны с низкой энергией, уменьшая лучевую нагрузку и улучшая качество изображений.

Сопоставление клинических данных с результатами двухэнергетической компьютерной томографии

В исследовании J.S. Lee и соавт. [43] акцентировано внимание на факторах, которые с большей вероятностью

являются предикторами наличия депозитов моноурата натрия на ДЭКТ. В группу таких параметров входят уровень мочевой кислоты в сыворотке крови, наличие почечной недостаточности и продолжительность заболевания. Так, диагностическая ценность ДЭКТ ограничена, если она проводится у пациента с впервые случившимся приступом подагрического артрита, а вероятность положительного результата ДЭКТ повышается у пациентов, страдающих подагрой уже длительное время. E. Jia и соавт. [44] установили, что чувствительность ДЭКТ увеличивается при более продолжительном течении заболевания. Чувствительность ДЭКТ составляла 35,7% на первичном визите по поводу подагры, 61,5% — в группе пациентов, страдающих подагрой менее двух лет, и 92,9% — у страдающих подагрой более двух лет. Согласно альтернативным данным, у 15–24% пациентов с асимптомной гиперурикемией наблюдаются отложения моноурата натрия на ДЭКТ, а при первом приступе подагрического артрита — у 32,8% [43]. Данный факт можно объяснить недостаточным для визуализации объёмом и концентрацией моноурата натрия у больных с впервые случившимся приступом подагрического артрита [45]. Таким образом, можно предположить, что применение методики ДЭКТ представляет больший интерес для динамического наблюдения, нежели для первичной диагностики, в то время как ультразвуковой метод может оказаться полезным именно в случае впервые случившегося подагрического приступа.

Хроническая болезнь почек и подагра являются коморбидными состояниями. Снижение экскреторной функции почек способствует задержке уратов в организме, что повышает вероятность отложения кристаллов моноурата натрия в суставах и других тканях. С другой стороны, в исследовании J. Shang и соавт. [46] не было выявлено значимой связи между наличием почечной недостаточности и объёмом депозитов моноурата натрия на ДЭКТ.

Предположение о том, что высокая концентрация мочевой кислоты в сыворотке крови коррелирует с положительными результатами исследования ДЭКТ, не всегда является верным. Дело в том, что при гипоурикемической терапии концентрация мочевой кислоты в сыворотке крови будет снижаться, что в дальнейшем приведёт к растворению депозитов моноурата натрия. При выполнении исследования в определённый временной промежуток возможна визуализация ещё не растворившихся кристаллов моноурата натрия при достаточно низкой концентрации мочевой кислоты. Таким образом, наблюдение за абсорбцией отложения уратов с помощью ДЭКТ даёт возможность оценивать эффективность проводимой терапии, а наглядность динамики способствует большей комплаентности пациентов. К тому же, не у всех пациентов с одинаково высоким уровнем мочевой кислоты в крови можно обнаружить депозиты моноурата натрия, следовательно, существуют и другие факторы, влияющие на положительный результат ДЭКТ, такие как генетическая предрасположенность и возраст [47].

В исследовании S. Bayat и соавт. [23] была разработана полуколичественная система оценки отложения кристаллов моноурата натрия (DECT urate scoring system) для наиболее поражаемой зоны — области стоп: исследуемая область делится на 4 части (первый плюснефаланговый сустав, остальные суставы стопы, лодыжки и сухожилия в области стоп и лодыжек), которым в зависимости от количества и характера депозитов присваиваются баллы и затем суммируются. С помощью полученного результата возможно установить наличие подагры, а также отследить эффективность гипоурикемической терапии. По сравнению с автоматическим подсчётом объёма депозитов моноурата натрия данная методика занимает меньше времени и облегчает работу в участках, где измерение затруднительно. Но данную систему оценки можно применить исключительно для поражений, локализованных в области стоп.

В работе J. Shang и соавт. [46], где использовался полуколичественный метод «DECT urate scoring system», корреляции между балльной оценкой и концентрацией мочевой кислоты в сыворотке крови обнаружено не было, однако была подтверждена связь между количеством моноурата натрия в тканях и длительным периодом заболевания, наличием эрозий и тофусов. Причиной несоответствия между результатами ДЭКТ и уровнем мочевой кислоты может являться и время проведённого исследования. В частности, установлен факт повышенной экскреции мочевой кислоты с мочой во время приступа подагрического артрита [48].

Однако имеются исследования с подтверждённой корреляцией между уровнем мочевой кислоты в сыворотке крови и наличием депозитов моноурата натрия на ДЭКТ. Например, N. Dalbeth и соавт. [49] сообщают, что у 90,0% пациентов с уровнем мочевой кислоты в крови ≥ 360 мМ и пальпируемыми тофусами были обнаружены отложения уратов, а у пациентов с непальпируемыми тофусами и более низкими данными лабораторного анализа депозиты моноурата натрия визуализировались только в 46,9% случаев. Стоит отметить, что все участники исследования принимали аллопуринол в дозировке 300 мг и более. Данная работа продемонстрировала также больший объём кристаллов моноурата натрия и количество эрозий в группе пациентов с уровнем мочевой кислоты в крови ≥ 360 мМ и пальпируемыми тофусами в сравнении с больными другой группы.

Возможности двухэнергетической компьютерной томографии в дифференциальной диагностике микрокристаллических артропатий, ассоциированных с отложением солей кальция

К группе микрокристаллических артропатий, помимо подагрического артрита, относятся артриты, возникшие

в результате отложения кристаллов пирофосфата кальция и гидроксиапатита кальция.

Болезнь депонирования кристаллов пирофосфата кальция — это заболевание, при котором происходит накопление кристаллов, в основном пирофосфата кальция, преимущественно в волокнистых и гиалиновых хрящах. Факторами риска являются возраст, травмы сустава, наследственность и наличие таких заболеваний, как гемохроматоз, первичный гиперпаратиреозидизм, гипофосфатазия, гипомагниемия [50].

Болезнь депонирования кристаллов пирофосфата кальция достаточно часто имитирует другие состояния, что приводит специалистов различных областей медицины в затруднение при постановке диагноза, а также может сочетаться с другими воспалительными артритами. Например, вероятность развития болезни депонирования кристаллов пирофосфата кальция выше у пациентов, страдающих подагрой или ревматоидным артритом [51]. Ввиду вышеперечисленных причин поиск подходящего метода диагностики для дифференциального диагноза становится необходимостью.

Клинически острый кристаллический артрит, ассоциированный с отложением пирофосфата кальция, достаточно похож на острый артрит, характерный для подагрического приступа, с единственным отличием в его продолжительности. Острый артрит, ассоциированный с отложением пирофосфата кальция, может длиться в течение недель и даже месяцев [52, 53].

Зачастую хронический кристаллический артрит, ассоциированный с отложением пирофосфата кальция, протекает как дегенеративный остеоартрит с признаками механической суставной боли, периодическими клиническими вспышками острого артрита, ассоциированными с отложением пирофосфата кальция [52]. Чаще всего поражаются межфаланговые, второй и третий пястно-фаланговые суставы, коленные суставы [52–54].

Возможно отложение кристаллов пирофосфата кальция по ходу крестообразной связки атланта, что проявляется синдромом «коронованного зуба» (crowned dens syndrome). Клиническая картина неспецифична и заключается в наличии острой боли в области шеи, повышенной температуры, ригидности мышц шеи, затылочной головной боли [55]. В данном случае дифференциальный диагноз проводят с менингитом, гигантоклеточным артериитом, ревматоидным артритом и др.

Иногда кристаллический артрит, ассоциированный с отложением пирофосфата кальция, может проявляться в форме полиартрита и, таким образом, имитировать ревматоидный артрит. Клинически отличия заключаются в том, что поражение суставов ввиду наличия кристаллов пирофосфата кальция возникает последовательно и менее симметрично, чем в случае ревматоидного артрита [53]. Тем не менее ориентироваться на данный клинический параметр достаточно проблематично. Артрит, ассоциированный с отложением пирофосфата кальция, может

имитировать не только ревматологические состояния, но и неврологические, онкологические и др. Развитие новых инструментальных методов крайне важно для однозначной и оперативной дифференциальной диагностики.

Для диагностики артрита, ассоциированного с отложением пирофосфата кальция, информативность показателей крови минимальна. Более значимый вклад вносят поляризационная световая микроскопия синовиальной жидкости и инструментальные методы исследования, такие как рентгенологическое, ультразвуковое исследование и компьютерная томография.

На сегодняшний день наиболее часто применяемым методом диагностики в рутинной практике, на основании которого ставится диагноз болезни депонирования кристаллов пирофосфата кальция, считается рентгенологическое исследование, в то время как поляризационная световая микроскопия синовиальной жидкости, согласно рекомендациям Европейской антиревматической лиги (EULAR), является золотым стандартом. Как обсуждалось ранее, данный метод имеет ограничения и недостатки, которые зачастую не поддаются коррекции

При рентгенологическом исследовании ключевым признаком болезни депонирования кристаллов пирофосфата кальция является наличие хондрокальциноза, которому чаще всего подвергаются мениски, треугольный хрящ в треугольном фиброзно-хрящевом комплексе, локтевой симфиз. Хондрокальциноз визуализируется в виде линейных зон уплотнения, параллельных поверхности кортикальной части кости, либо вкраплений спикулообразной формы, расположенных вдоль хрящевой структуры, либо облаковидных наложений по контуру синовиальной оболочки [56]. Данный метод имеет неоспоримые преимущества, а именно неинвазивность, отсутствие ятрогенных осложнений, скорость выполнения и невысокая стоимость. В то же время рентгенография не является высокочувствительным и абсолютно специфичным методом по отношению к болезни депонирования кристаллов пирофосфата кальция, так как аналогичная картина возможна при отложении в хрящах гидроксиапатита кальция [50]. По данным К.А. Lee и соавт. [57], специфичность и чувствительность данного метода составили 96,9% и 44,2% соответственно.

Отличить остеоартрит, ассоциированный с отложением пирофосфата кальция, от дегенеративного остеоартрита с помощью рентгенологического метода исследования достаточно сложно, так как используемые признаки дифференциальной диагностики не являются абсолютными. К ним относятся наличие более выраженных остеофитов и субхондральных кист, деструкция костной ткани, локализация поражений и клиническая картина воспаления [50, 53, 54, 58]. Так, для дегенеративного остеоартрита менее характерно вовлечение в процесс плечевого сустава, суставов кисти и пястно-фаланговых суставов, чем для остеоартрита, ассоциированного с отложением пирофосфата кальция [53]. Более крупные субхондральные

кисты и выраженная деструкция костной ткани чаще наблюдаются при остеоартрите, ассоциированном с пирофосфатом кальция [54]. Стоит также обратить внимание на кальцинированные сухожилие четырёхглавой мышцы и ахиллово сухожилие при наличии признаков хондрокальциноза, что, вероятнее всего, свидетельствует о диагнозе болезни депонирования кристаллов пирофосфата кальция [56].

Ультразвуковое исследование становится всё более популярным благодаря низкой стоимости, мобильности оборудования и удобства в использовании. В. Frediani и соавт. [59] описали три типа ультразвуковых признаков, обнаруживаемых у пациентов, страдающих болезнью депонирования кристаллов пирофосфата кальция. Один из них — наличие гиперэхогенных линейных полос, параллельных поверхности хряща. Данная картина чаще встречается при отложении пирофосфата кальция в гиалиновых хрящах. Другой признак более характерен для депонирования пирофосфата кальция в волокнистых хрящах и заключается в наличии точечных гиперэхогенных включений по ходу хрящевой ткани. Реже всего визуализировалась гиперэхогенная взвесь, содержащая подвижные агрегаты кристаллов пирофосфата кальция округлой и/или овальной формы, в полости сустава. По данным К.А. Lee и соавт. [57], специфичность и чувствительность ультразвукового метода составили 77,1% и 74,4% соответственно. Важно обратить внимание на то, что с помощью данного метода, возможно, будет сложно отличить друг от друга ультразвуковые признаки, характерные для подагры и для болезни депонирования кристаллов пирофосфата кальция, особенно врачам, которые не являются специалистами в области ультразвуковой диагностики. К недостаткам метода можно отнести сильную зависимость результатов от оператора. К тому же при выраженных остеофитах на крайних стадиях остеоартрита могут возникнуть трудности в исследовании из-за наличия акустической тени от костной ткани [60].

Компьютерная томография используется в основном в случаях локализации процесса в осевом скелете: при синдроме «коронованного зуба», поражении межпозвоночных дисков [61]. Достаточно чётко визуализируется в атлanto-аксиальном суставе обызвествление поперечной связки, крыловидных связок, апикальной связки, крестообразной связки; встречается обызвествление жёлтой связки в виде нодулярных очагов [62].

Роль ДЭКТ в диагностике болезни депонирования кристаллов пирофосфата кальция до сих пор однозначно не определена. На изображениях с цветовой кодировкой, полученных с помощью ДЭКТ в классе «Dual Energy Gout», отложения, содержащие кальций, будут окрашены в синий цвет, что позволяет однозначно отличить их от депозитов моноурата натрия. Стоит отметить, что кортикальная кость кодируется аналогично депозитам пирофосфата кальция и гидроксиапатита ввиду высокого содержания кальция (рис. 4).

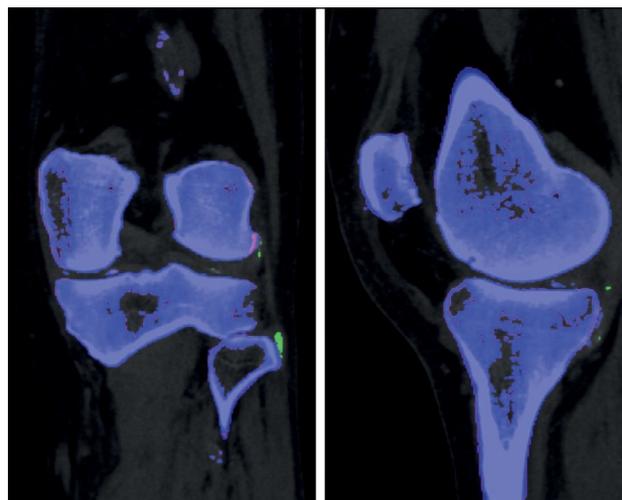


Рис. 4. Двухэнергетические изображения с цветовой кодировкой в коронарной и сагиттальной проекциях (область левого коленного сустава). Кальциноз медиального мениска (данные двухэнергетической компьютерной томографии МНОЦ МГУ).

По данным D. Kravchenko и соавт. [63], чувствительность и специфичность ДЭКТ при обнаружении кристаллов пирофосфата кальция составили 55% и 92% соответственно (при длительности заболевания в среднем 1 месяц и с использованием стандартизированных протоколов сканирования для подагры). Н. Tanikawa и соавт. [60] установили, что чувствительность и специфичность ДЭКТ при обнаружении кристаллов пирофосфата кальция в менисках *ex vivo* составили 77,8% и 93,8% соответственно.

В настоящее время не существует специального протокола для болезни депонирования кристаллов пирофосфата кальция, вследствие чего невозможно произвести расчёт объёма депозитов пирофосфата кальция, а в некоторых случаях даже достоверно отличить их от костной ткани. Группой исследователей S.K. Tedeschi и соавт. [64] были модифицированы параметры реконструкции изображений для подагры путём увеличения значения показателя «Iodine Ratio», в результате чего отмечалось увеличение чувствительности метода до 90–100% по отношению к кристаллам пирофосфата кальция. В то же время была потеряна возможность дифференциальной диагностики между кристаллами моноурата натрия и пирофосфата кальция.

К преимуществам ДЭКТ можно отнести способность различать депозиты гидроксиапатита кальция и пирофосфата кальция. Известно, что отложения гидроксиапатита кальция в типичном случае откладываются вдоль сухожилий, но, к сожалению, этот признак не является абсолютным для дифференциальной диагностики. Рентгенологически соли кальция определяются как хондрокальциноз, что тоже не помогает в определении химического состава депозитов. Значения плотности при мультиспиральной компьютерной томографии тоже не могут являться однозначным ориентиром.

С помощью ДЭКТ возможно проведение спектрального анализа депозитов гидроксипатита кальция и пирофосфата кальция с использованием значений двухэнергетического индекса и эффективного атомного номера (Zeff), которые являются продуктом математической обработки результатов ДЭКТ-сканирования. Данные параметры помогают отличить два типа кристаллов друг от друга [65]. Хотя применение двухэнергетического индекса и Zeff для дифференциальной диагностики депозитов солей кальция ещё не вошло в рутинную практику, это направление достаточно перспективно и интересно для дальнейшего исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ДЭКТ является перспективным и многообещающим методом диагностики кристаллических артропатий, который имеет ряд преимуществ в сравнении с такими методами исследования, как поляризационная микроскопия, ультразвуковое и рентгенологическое исследование, компьютерная томография. К положительным сторонам ДЭКТ относятся скорость выполнения, исключение риска ятрогенных осложнений, возможность качественной и количественной оценки материала и динамического наблюдения. Этот метод лучевой диагностики решает многие задачи, в частности контроль эффективности проводимой терапии при подагре, возможность проведения дифференциальной диагностики кристаллических артропатий.

Несмотря на то, что данная методика не лишена недостатков, существуют способы, которые помогают достичь корректной интерпретации результатов ДЭКТ.

ДЭКТ мог бы упростить верификацию артритов, ассоциированных с отложением разных типов кристаллов, с нетипичной симптоматикой, однако остаются вопросы, касающиеся диагностики подагры на ранней стадии, возможности достоверного отличия кристаллов пирофосфата кальция и гидроксипатита кальция, определения их объёма, что требует дальнейших исследований в этой области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Neogi T., Jansen T.L., Dalbeth N., et al. 2015 Gout classification criteria: An American college of rheumatology / European league against rheumatism collaborative initiative // *Arthritis Rheumatol.* 2015. Vol. 67, N 10. P. 2557–2568. doi: 10.1002/art.39254
2. Taylor W.J., Fransen J., Dalbeth N., et al. Diagnostic arthrocentesis for suspicion of gout is safe and well tolerated // *J Rheumatol.* 2016. Vol. 43, N 1. P. 150–153. doi: 10.3899/jrheum.150684
3. Сикилинда Д.В., Алабут А.В. Протоколы техники пункций суставов и лечебных блокад при травмах и ортопедических заболеваниях опорно-двигательного аппарата // *Главный врач Юга России.* 2018. Т. 2, № 60. С. 14–20.
4. Stauder S.K., Peloso P.M. Dual-Energy computed tomography has additional prognostic value over clinical measures in gout

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

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: М.В. Онойко — поиск публикаций по теме статьи, написание текста рукописи; Е.А. Мершина — экспертная оценка информации, редактирование текста рукописи, утверждение финальной версии; О.А. Георгинова — экспертная оценка информации, редактирование текста рукописи, утверждение финальной версии; М.Л. Плотникова — редактирование статьи; А.В. Панюкова — редактирование статьи; В.Е. Сеницын — экспертная оценка информации, утверждение финальной версии.

ADDITIONAL INFORMATION

Funding source. The work was conducted within the framework of the state assignment of the Lomonosov Moscow State University.

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. M.V. Onoyko — search for publications on the article topic, writing the text of the manuscript; E.A. Mershina — expert evaluation of information, editing of the text of the manuscript, final version approval; O.A. Georginova — expert evaluation of information, editing of the text of the manuscript, final version approval; M.L. Plotnikova — editing of the text of the manuscript; A.V. Panyukova — editing of the text of the manuscript; V.E. Sinitin — expert evaluation of information, final version approval.

including tophi: A systematic literature review // *J Rheumatol.* 2022. Vol. 49, N 11. P. 1256–1268. doi: 10.3899/jrheum.211246

5. Федеральные клинические рекомендации. Подагра. Общероссийская общественная организация Ассоциация ревматологов России, 2014.

6. Dalbeth N., Phipps-Green A., Frampton C., et al. Relationship between serum urate concentration and clinically evident incident gout: An individual participant data analysis // *Ann Rheum Dis.* 2018. Vol. 77, N 7. P. 1048–1052. doi: 10.1136/annrheumdis-2017-212288

7. Переверзев А.П., Остроумова О.Д. Лекарственно-индуцированные гиперурикемия/подагра. Часть 2: отдельные лекарственные средства, прием которых ассоциирован с повышенным

- риском развития этих заболеваний // *Терапия*. 2021. Т. 7, № 6. С. 136–145. doi: 10.18565/therapy.2021.7.159-169
8. Chhana A., Lee G., Dalbeth N. Factors influencing the crystallization of monosodium urate: a systematic literature review // *BMC Musculoskelet Disord*. 2015. Vol. 16, N 1. P. 1–11. doi: 10.1186/s12891-015-0762-4
9. Fiddis R.W., Vlachos N., Calvert P.D. Studies of urate crystallisation in relation to gout // *Ann Rheum Dis*. 1983. Vol. 42, Suppl. 1. P. 12. doi: 10.1136/ard.42.suppl_1.12
10. Dalbeth N., Pool B., Gamble G.D., et al. Cellular characterization of the gouty tophus: A quantitative analysis // *Arthritis Rheum*. 2010. Vol. 62, N 5. P. 1549–1556. doi: 10.1002/art.27356
11. Butler F., Alghubayshi A., Roman Y. The epidemiology and genetics of hyperuricemia and gout across major racial groups: A literature review and population genetics secondary database analysis // *J Personalized Med*. 2021. Vol. 11, N 3. P. 231. doi: 10.3390/jpm11030231
12. Meneses-Leon J., Denova-Gutiérrez E., Castañón-Robles S., et al. Sweetened beverage consumption and the risk of hyperuricemia in Mexican adults: A cross-sectional study // *BMC Public Health*. 2014. Vol. 14, N 1. P. 1–11. doi: 10.1186/1471-2458-14-445
13. Bae J., Chun B.Y., Park P.S., et al. Higher consumption of sugar-sweetened soft drinks increases the risk of hyperuricemia in Korean population: The Korean multi-rural communities cohort study // *Semin Arthritis Rheum*. 2014. Vol. 43, N 5. P. 654–661. doi: 10.1016/j.semarthrit.2013.10.008
14. Zhang W., Doherty M., Pascual E., et al. EULAR evidence based recommendations for gout. Part I: Diagnosis. Report of a task force of the standing committee for international clinical studies including therapeutics (ESCIIT) // *Ann Rheum Dis*. 2006. Vol. 65, N 10. P. 1301–1311. doi: 10.1136/ard.2006.055251
15. Kienhorst L.B., Janssens H.J., Eijgelaar R.S., et al. The detection of monosodium urate crystals in synovial fluid after long-term and varying storage conditions // *Joint Bone Spine*. 2015. Vol. 82, N 6. P. 470–471. doi: 10.1016/j.jbspin.2014.10.020
16. Секреты ревматологии / под ред. С.Д. Уэст. Пер. с англ. под ред. О.М. Лесняк. Москва: ГЭОТАР-Медиа, 2021. 756 с.
17. Malik A., Schumacher H.R., Dinnella J.E., Clayburne G.M. Clinical diagnostic criteria for gout: Comparison with the gold standard of synovial fluid crystal analysis // *J Clin Rheumatol*. 2009. Vol. 15, N 1. P. 22–24. doi: 10.1097/RHU.0b013e3181945b79
18. Pascal Z., Valcov R., Fabreguet I., et al. A prospective evaluation of ultrasound as a diagnostic tool in acute microcrystalline arthritis // *Arthritis Res Ther*. 2015. Vol. 17, N 1. P. 1–8. doi: 10.1186/s13075-015-0701-7
19. Omoumi P., Becce F., Racine D., et al. Dual-Energy CT: Basic principles, technical approaches, and applications in musculoskeletal imaging (Part 1) // *Semin Musculoskelet Radiol*. 2015. Vol. 19, N 5. P. 431–437. doi: 10.1055/s-0035-1569253
20. Ogdie A., Taylor W.J., Weatherall M., et al. Imaging modalities for the classification of gout: Systematic literature review and meta-analysis // *Ann Rheum Dis*. 2015. Vol. 74, N 10. P. 1868–1874. doi: 10.1136/annrheumdis-2014-205431
21. Sapsford M., Gamble G.D., Aati O., et al. Relationship of bone erosion with the urate and soft tissue components of the tophus in gout: A dual energy computed tomography study // *Rheumatology (Oxford)*. 2017. Vol. 56, N 1. P. 129–133. doi: 10.1093/rheumatology/kew383
22. Towiwat P., Doyle A.J., Gamble G.D., et al. Urate crystal deposition and bone erosion in gout: “Inside-out” or “outside-in”? A dual-energy computed tomography study // *Arthritis Res Ther*. 2016. Vol. 18, N 1. P. 208. doi: 10.1186/s13075-016-1105-z
23. Bayat S., Aati O., Rech J., et al. Development of a dual-energy computed tomography scoring system for measurement of urate deposition in gout // *Arthritis Care Res (Hoboken)*. 2016. Vol. 68, N 6. P. 769–775. doi: 10.1002/acr.22754
24. Rajiah P., Sundaram M., Subhas N. Dual-energy CT in musculoskeletal imaging: What is the role beyond gout? // *AJR Am J Roentgenol*. 2019. Vol. 213, N 3. P. 493–505. doi: 10.2214/AJR.19.21095
25. Климкова М.М., Синицын В.Е., Мазуренко Д.А., и др. Перспективы применения двухэнергетической компьютерной томографии в диагностике мочекаменной болезни и определении химического состава мочевых камней (обзор литературы) // *Медицинская визуализация*. 2016. № 6. С. 84–92.
26. McCollough C.H., Leng S., Yu L., et al. Principles, technical approaches, and clinical applications // *Radiology*. 2015. Vol. 276, N 3. P. 637–653. doi: 10.1148/radiol.2015142631
27. Sodickson A.D., Keraliya A., Czakowski B., et al. Dual energy CT in clinical routine: How it works and how it adds value // *Emerg Radiol*. 2021. Vol. 28, N 1. P. 103–117. doi: 10.1007/s10140-020-01785-2
28. Megibow A.J., Kambadakone A., Ananthakrishnan L. Dual-energy computed tomography: Image acquisition, processing, and workflow // *Radiol Clin North Am*. 2018. Vol. 56, N 4. P. 507–520. doi: 10.1016/j.rcl.2018.03.001
29. Forghani R., De Man B., Gupta R. Dual-energy computed tomography: Physical principles, approaches to scanning, usage, and implementation: Part 2 // *Neuroimaging Clin N Am*. 2017. Vol. 27, N 3. P. 385–400. doi: 10.1016/j.nic.2017.03.002
30. Henzler T., Fink C., Schoenberg S.O., et al. Radiation dose aspects // *AJR Am J Roentgenol*. 2012. Vol. 199, N 5. P. S16–S25. doi: 10.2214/AJR.12.9210
31. Borges A.P., Antunes C., Curvo-Semedo L. Pros and cons of dual-energy CT systems: “One does not fit all” // *Tomography*. 2023. Vol. 9, N 1. P. 195–216. doi: 10.3390/tomography9010017
32. Parakh A., Lennartz S., An C., et al. Dual-energy CT images: Pearls and pitfalls // *Radiographics*. 2021. Vol. 41, N 1. P. 98–119. doi: 10.1148/rg.2021200102
33. Gosangi B., Mandell M.C., Weaver M.J., et al. Bone marrow edema at dual-energy CT: A game changer in the emergency department // *Radiographics*. 2020. Vol. 40, N 3. P. 859–874. doi: 10.1148/rg.2020190173
34. Goo H.W., Goo J.M. Dual-energy CT: New horizon in medical imaging // *Korean J Radiol*. 2017. Vol. 18, N 4. P. 555–569. doi: 10.3348/kjr.2017.18.4.555
35. Baer A.N., Kurano T., Thakur U.J., et al. Dual-energy computed tomography has limited sensitivity for non-tophaceous gout: A comparison study with tophaceous gout // *BMC Musculoskelet Disord*. 2016. Vol. 17, N 1. P. 1–9. doi: 10.1186/s12891-016-0943-9
36. Bongartz T., Glazebrook K.N., Kavros S.J., et al. Dual-energy CT for the diagnosis of gout: An accuracy and diagnostic yield study // *Ann Rheum Dis*. 2015. Vol. 74, N 6. P. 1072–1077. doi: 10.1136/annrheumdis-2013-205095
37. Huppertz A., Hermann A., Diekhoff T., et al. Systemic staging for urate crystal deposits with dual-energy CT and ultrasound in patients with suspected gout // *Rheumatol Int*. 2014. Vol. 3. P. 763–771. doi: 10.1007/s00296-014-2979-19

- 38.** Strobl S., Halpern E.J., Abd Ellah M., et al. Acute gouty knee arthritis: Ultrasound findings compared with dual-energy CT findings // *AJR Am J Roentgenol.* 2018. Vol. 210, N 6. P. 1323–1329. doi: 10.2214/AJR.17.19199
- 39.** Mallinson P.I., Coupal T., Reisinger C., et al. Artifacts in dual-energy CT gout protocol: A review of 50 suspected cases with an artifact identification guide // *AJR Am J Roentgenol.* 2014. Vol. 203, N 1. P. 103–109. doi: 10.2214/AJR.13.11396
- 40.** Omoumi P., Zufferey P., Malghem J., So A. Imaging in gout and other crystal-related arthropathies // *Rheum Dis Clin North Am.* 2016. Vol. 42, N 4. P. 624–644. doi: 10.1016/j.rdc.2016.07.005
- 41.** Lee S.M., Lee J.G., Lee G., et al. CT image conversion among different reconstruction kernels without a sinogram by using a convolutional neural network // *Korean J Radiol.* 2019. Vol. 20, N 2. P. 295–303. doi: 10.3348/kjr.2018.0249
- 42.** Alavandar E., Arunachalam V.K., Narappulan N., et al. Principles and available hardware in dect // *J Gastrointestinal Abdominal Radiol.* 2022. Vol. 5, N 6. doi: 10.1055/s-0042-1742772
- 43.** Lee J.S., Seo W.J. What is the diagnostic value of dual-energy computed tomography in patients with clinical diagnosis of gout? // *Adv Rheumatol.* 2021. Vol. 61, N 1. P. 1–7. doi: 10.1186/s42358-021-00198-0
- 44.** Jia E., Zhu J., Huang W., et al. Dual-energy computed tomography has limited diagnostic sensitivity for short-term gout // *Clin Rheumatol.* Vol. 37, N 3. P. 773–777. doi: 10.1007/s10067-017-3753-z
- 45.** Ramon A., Ornetti P. Dual energy computed tomography: A breakthrough for gout? // *Joint Bone Spine.* 2020. Vol. 87, N 4. P. 289–291. doi: 10.1016/j.jbspin.2019.12.002
- 46.** Shang J., Li X.H., Lu S.Q., et al. Gout of feet and ankles in different disease durations: Diagnostic value of single-source DECT and evaluation of urate deposition with a novel semi-quantitative DECT scoring system // *Adv Rheumatol.* 2021. Vol. 61, N 1. P. 1–14. doi: 10.1186/s42358-021-00194-4
- 47.** Wang P., Smith S.E., Garg R., et al. Identification of monosodium urate crystal deposits in patients with asymptomatic hyperuricemia using dual-energy CT // *RMD Open.* 2018. Vol. 4, N 1. P. 593–597. doi: 10.1136/rmdopen-2017-000593
- 48.** Urano W., Yamanaka H., Tsutani H., et al. The inflammatory process in the mechanism of decreased serum uric acid concentrations during acute gouty arthritis // *J Rheumatol.* 2002. Vol. 29, N 9. P. 1950–1953.
- 49.** Dalbeth N., Nicolaou S., Baumgartner S., et al. Presence of monosodium urate crystal deposition by dual-energy CT in patients with gout treated with allopurinol // *Ann Rheum Dis.* 2018. Vol. 77, N 3. P. 364–370. doi: 10.1136/annrheumdis-2017-212046
- 50.** Zhang W., Doherty M., Bardin T., et al. European league against rheumatism recommendations for calcium pyrophosphate deposition. Part I: Terminology and diagnosis // *Ann Rheum Dis.* 2011. Vol. 70, N 4. P. 563–570. doi: 10.1136/ard.2010.139105
- 51.** Sabchysyn V., Konon I., Ryan L.M., Rosenthal A.K. Concurrence of rheumatoid arthritis and calcium pyrophosphate deposition disease: A case collection and review of the literature // *Semin Arthritis Rheum.* 2018. Vol. 48, N 1. P. 9–11. doi: 10.1016/j.semarthrit.2017.11.009
- 52.** Williams C.J., Rosenthal A.K. Pathogenesis of calcium pyrophosphate deposition disease // *Best Pract Res Clin Rheumatol.* 2021. Vol. 35, N 4. P. 101718. doi: 10.1016/j.berh.2021.101718
- 53.** Abhishek A. Calcium pyrophosphate deposition // *Br J Hosp Med (Lond).* 2014. Vol. 75, N 4. P. 61–64. doi: 10.12968/hmed.2014.75.sup4.c61
- 54.** Miksanek J., Rosenthal A.K. Imaging of calcium pyrophosphate deposition disease // *Curr Rheumatol Rep.* 2015. Vol. 17, N 3. P. 20. doi: 10.1007/s11926-015-0496-1
- 55.** Godfrin-Valnet M., Godfrin G., Godard J., et al. Eighteen cases of crowned dens syndrome: Presentation and diagnosis // *Neurochirurgie.* 2013. Vol. 59, N 3. P. 115–120. doi: 10.1016/j.neuchi.2013.03.003
- 56.** Cipolletta E., Filippou G., Scirè C.A., et al. The diagnostic value of conventional radiography and musculoskeletal ultrasonography in calcium pyrophosphate deposition disease: A systematic literature review and meta-analysis // *Osteoarthritis Cartilage.* 2021. Vol. 29, N 5. P. 619–632. doi: 10.1016/j.joca.2021.01.007
- 57.** Lee K.A., Lee S.H., Kim H.R. Diagnostic value of ultrasound in calcium pyrophosphate deposition disease of the knee joint // *Osteoarthritis Cartilage.* 2019. Vol. 27, N 5. P. 781–787. doi: 10.1016/j.joca.2018.11.013
- 58.** Neame R.L., Carr A.J., Muir K., Doherty M. UK community prevalence of knee chondrocalcinosis: Evidence that correlation with osteoarthritis is through a shared association with osteophyte // *Ann Rheum Dis.* 2003. Vol. 62, N 6. P. 513–518. doi: 10.1136/ard.62.6.513
- 59.** Frediani B., Filippou G., Falsetti P., et al. Diagnosis of calcium pyrophosphate dihydrate crystal deposition disease: Ultrasonographic criteria proposed // *Ann Rheum Dis.* 2005. Vol. 64, N 4. P. 638–640. doi: 10.1136/ard.2004.024109
- 60.** Tanikawa H., Ogawa R., Okuma K., et al. Detection of calcium pyrophosphate dihydrate crystals in knee meniscus by dual-energy computed tomography // *J Orthop Surg Res.* 2018. Vol. 13, N 1. P. 73. doi: 10.1186/s13018-018-0787-0
- 61.** Rosales-Alexander J.L., Aznar J.B., Magro-Checa C. Calcium pyrophosphate crystal deposition disease: Diagnosis and treatment // *Open Access Rheumatol.* 2014. Vol. 6. P. 39–47. doi: 10.2147/OARRR.S39039
- 62.** Sekijima Y., Yoshida T., Ikeda S.I. CPPD crystal deposition disease of the cervical spine: A common cause of acute neck pain encountered in the neurology department // *J Neurol Sci.* 2010. Vol. 296, N 1–2. P. 79–82. doi: 10.1016/j.jns.2010.05.028
- 63.** Kravchenko D., Karakostas P., Kuetting D., et al. The role of dual energy computed tomography in the differentiation of acute gout flares and acute calcium pyrophosphate crystal arthritis // *Clin Rheumatol.* 2022. Vol. 41, N 1. P. 223–233. doi: 10.1007/s10067-021-05949-4
- 64.** Tedeschi S.K., Solomon D.H., Yoshida K., et al. A prospective study of dual-energy CT scanning, US and X-ray in acute calcium pyrophosphate crystal arthritis // *Rheumatology (Oxford).* 2020. Vol. 59, N 4. P. 900–903. doi: 10.1093/rheumatology/kez431
- 65.** Pascart T., Norberciak L., Legrand J., et al. Dual-energy computed tomography in calcium pyrophosphate deposition: Initial clinical experience // *Osteoarthritis Cartilage.* 2019. Vol. 27, N 9. P. 1309–1314. doi: 10.1016/j.joca.2019.05.007

REFERENCES

- 1.** Neogi T, Jansen TL, Dalbeth N, et al. 2015 Gout classification criteria: An American college of rheumatology / European league against rheumatism collaborative initiative. *Arthritis Rheumatol.* 2015;67(10):2557–2568. doi: 10.1002/art.39254
- 2.** Taylor WJ, Fransen J, Dalbeth N, et al. Diagnostic arthrocentesis for suspicion of gout is safe and well tolerated. *J Rheumatol.* 2016;43(1):150–153. doi: 10.3899/jrheum.150684

3. Sikilinda V, Alabut A. Protocols of technique of punctions of joints and treatment blockades in trauma and orthopedic diseases of support-moving apparatus. *Chief Physician South Russia*. 2018;2(60):14–20. (In Russ).
4. Stauder SK, Peloso PM. Dual-Energy computed tomography has additional prognostic value over clinical measures in gout including tophi: A systematic literature review. *J Rheumatol*. 2022;49(11):1256–1268. doi: 10.3899/jrheum.211246
5. Federal Clinical Guidelines. Gout. All-Russian Public Organization Association of Rheumatologists of Russia; 2014. (In Russ).
6. Dalbeth N, Phipps-Green A, Frampton C, et al. Relationship between serum urate concentration and clinically evident incident gout: An individual participant data analysis. *Ann Rheum Dis*. 2018;77(7):1048–1052. doi: 10.1136/annrheumdis-2017-212288
7. Pereverzev AP, Ostroumova OD. Drug-induced hyperuricemia/gout. Part I: Prevalence, pathophysiology, risk factors, clinical pattern. *Therapy*. 2021;7(6):136–145. (In Russ). doi: 10.18565/therapy.2021.7.159-169
8. Chhana A, Lee G, Dalbeth N. Factors influencing the crystallization of monosodium urate: A systematic literature review. *BMC Musculoskelet Disord*. 2015;16(1):1–11. doi: 10.1186/s12891-015-0762-4
9. Fiddis RW, Vlachos N, Calvert PD. Studies of urate crystallisation in relation to gout. *Ann Rheum Dis*. 1983;42(Suppl 1):12. doi: 10.1136/ard.42.suppl_1.12
10. Dalbeth N, Pool B, Gamble GD, et al. Cellular characterization of the gouty tophus: A quantitative analysis. *Arthritis Rheum*. 2010;62(5):1549–1556. doi: 10.1002/art.27356
11. Butler F, Alghubayshi A, Roman Y. The epidemiology and genetics of hyperuricemia and gout across major racial groups: A literature review and population genetics secondary database analysis. *J Personalized Med*. 2021;11(3):231. doi: 10.3390/jpm11030231
12. Meneses-Leon J, Denova-Gutiérrez E, Castañón-Robles S, et al. Sweetened beverage consumption and the risk of hyperuricemia in Mexican adults: A cross-sectional study. *BMC Public Health*. 2014;14(1):1–11. doi: 10.1186/1471-2458-14-445
13. Bae J, Chun BY, Park PS, et al. Higher consumption of sugar-sweetened soft drinks increases the risk of hyperuricemia in Korean population: The Korean multi-rural communities cohort study. *Semin Arthritis Rheum*. 2014;43(5):654–661. doi: 10.1016/j.semarthrit.2013.10.008
14. Zhang W, Doherty M, Pascual E, et al. EULAR evidence based recommendations for gout. Part I: Diagnosis. Report of a task force of the standing committee for international clinical studies including therapeutics (ESCSIT). *Ann Rheum Dis*. 2006;65(10):1301–1311. doi: 10.1136/ard.2006.055251
15. Kienhorst LB, Janssens HJ, Eijgelaar RS, et al. The detection of monosodium urate crystals in synovial fluid after long-term and varying storage conditions. *Joint Bone Spine*. 2015;82(6):470–471. doi: 10.1016/j.jbspin.2014.10.020
16. Secrets of rheumatology. Ed. by S.D. West. Trans. from English ed. by O.M. Lesnyak. Moscow: GEOTAR-Media; 2021. 756 p. (In Russ).
17. Malik A, Schumacher HR, Dinnella JE, Clayburne GM. Clinical diagnostic criteria for gout: Comparison with the gold standard of synovial fluid crystal analysis. *J Clin Rheumatol*. 2009;15(1):22–24. doi: 10.1097/RHU.0b013e3181945b79
18. Pascal Z, Valcov R, Fabreguet I, et al. A prospective evaluation of ultrasound as a diagnostic tool in acute microcrystalline arthritis. *Arthritis Res Ther*. 2015;17(1):1–8. doi: 10.1186/s13075-015-0701-7
19. Omoumi P, Becce F, Racine D, et al. Basic principles, technical approaches, and applications in musculoskeletal imaging (Part I). *Semin Musculoskelet Radiol*. 2015;19(5):431–437. doi: 10.1055/s-0035-1569253
20. Ogdie A, Taylor WJ, Weatherall M, et al. Imaging modalities for the classification of gout: systematic literature review and meta-analysis. *Ann Rheum Dis*. 2015;74(10):1868–1874. doi: 10.1136/annrheumdis-2014-205431
21. Sapsford M, Gamble GD, Aati O, et al. Relationship of bone erosion with the urate and soft tissue components of the tophus in gout: A dual energy computed tomography study. *Rheumatology (Oxford)*. 2017;56(1):129–133. doi: 10.1093/rheumatology/kew383
22. Towiwat P, Doyle AJ, Gamble GD, et al. Urate crystal deposition and bone erosion in gout: “Inside-out” or “outside-in”? A dual-energy computed tomography study. *Arthritis Res Ther*. 2016;18(1):208. doi: 10.1186/s13075-016-1105-z
23. Bayat S, Aati O, Rech J, et al. Development of a dual-energy computed tomography scoring system for measurement of urate deposition in gout. *Arthritis Care Res (Hoboken)*. 2016;68(6):769–775. doi: 10.1002/acr.22754
24. Rajiah P, Sundaram M, Subhas N. Dual-energy CT in musculoskeletal imaging: What is the role beyond gout? *AJR Am J Roentgenol*. 2019;213(3):493–505. doi: 10.2214/AJR.19.21095
25. Klimkova MM, Sinitsyn VE, Mazurenko DA, et al. Perspectives of dual-energy computed tomography in diagnostic of urinary stone disease for the determination of urinary calculi composition (review). *Med Visualization*. 2016;(6):84–92. (In Russ).
26. McCollough CH, Leng S, Yu L, Fletcher JG. Dual- and multi-energy CT: Principles, technical approaches, and clinical applications. *Radiology*. 2015;276(3):637–653. doi: 10.1148/radiol.2015142631
27. Sodickson AD, Keraliya A, Czakowski B, et al. Dual energy CT in clinical routine: How it works and how it adds value. *Emerg Radiol*. 2021;28(1):103–117. doi: 10.1007/s10140-020-01785-2
28. Megibow AJ, Kambadakone A, Ananthkrishnan L. Dual-energy computed tomography: Image acquisition, processing, and workflow. *Radiol Clin North Am*. 2018;56(4):507–520. doi: 10.1016/j.rcl.2018.03.001
29. Forghani R, De Man B, Gupta R. Dual-energy computed tomography: Physical principles, approaches to scanning, usage, and implementation: Part 2. *Neuroimaging Clin N Am*. 2017;27(3):385–400. doi: 10.1016/j.nic.2017.03.002
30. Henzler T, Fink C, Schoenberg SO, et al. Radiation dose aspects. *AJR Am J Roentgenol*. 2012;199(5 Suppl):S16–S25. doi: 10.2214/AJR.12.9210
31. Borges AP, Antunes C, Curvo-Semedo L. Pros and cons of dual-energy CT systems: “One does not fit all”. *Tomography*. 2023;9(1):195–216. doi: 10.3390/tomography9010017
32. Parakh A, Lennartz S, An C, et al. Dual-energy CT images: Pearls and pitfalls. *Radiographics*. 2021;41(1):98–119. doi: 10.1148/rg.2021200102
33. Gosangi B, Mandell MC, Weaver MJ, et al. Bone marrow edema at dual-energy CT: A game changer in the emergency department. *Radiographics*. 2020;40(3):859–874. doi: 10.1148/rg.2020190173
34. Goo HW, Goo JM. Dual-energy CT. New horizon in medical imaging. *Korean J Radiol*. 2017;18(4):555–569. doi: 10.3348/kjr.2017.18.4.555

35. Baer AN, Kurano T, Thakur UJ, et al. Dual-energy computed tomography has limited sensitivity for non-tophaceous gout: A comparison study with tophaceous gout. *BMC Musculoskelet Disord*. 2016;17(1):1–9. doi: 10.1186/s12891-016-0943-9
36. Bongartz T, Glazebrook KN, Kavros SJ, et al. Dual-energy CT for the diagnosis of gout: an accuracy and diagnostic yield study. *Ann Rheum Dis*. 2015;74(6):1072–1077. doi: 10.1136/annrheumdis-2013-205095
37. Huppertz A, Hermann A, Diekhoff T, et al. Systemic staging for urate crystal deposits with dual-energy CT and ultrasound in patients with suspected gout. *Rheumatol Int*. 2014;(3):763–771. doi: 10.1007/s00296-014-2979-1
38. Strobl S, Halpern EJ, Abd Ellah M, et al. Acute gouty knee arthritis: Ultrasound findings compared with dual-energy CT findings. *AJR Am J Roentgenol*. 2018;210(6):1323–1329. doi: 10.2214/AJR.17.19199
39. Mallinson PI, Coupal T, Reisinger C, et al. Artifacts in dual-energy CT gout protocol: A review of 50 suspected cases with an artifact identification guide. *AJR Am J Roentgenol*. 2014;203(1):103–109. doi: 10.2214/AJR.13.11396
40. Omoumi P, Zufferey P, Malghem J, So A. Imaging in gout and other crystal-related arthropathies. *Rheum Dis Clin North Am*. 2016;42(4):624–644. doi: 10.1016/j.rdc.2016.07.005
41. Lee SM, Lee JG, Lee G, et al. CT Image conversion among different reconstruction kernels without a sinogram by using a convolutional neural network. *Korean J Radiol*. 2019;20(2):295–303. doi: 10.3348/kjr.2018.0249
42. Alavandar E, Arunachalam VK, Narappulan N, et al. Principles and available hardware in DECT. *J Gastrointestinal Abdominal Radiology*. 2022;5(6). doi: 10.1055/s-0042-1742772
43. Lee JS, Seo WJ. What is the diagnostic value of dual-energy computed tomography in patients with clinical diagnosis of gout? *Adv Rheumatol*. 2021;61(1):1–7. doi: 10.1186/s42358-021-00198-0
44. Jia E, Zhu J, Huang W, et al. Dual-energy computed tomography has limited diagnostic sensitivity for short-term gout. *Clin Rheumatol*. 2018;37(3):773–777. doi: 10.1007/s10067-017-3753-z
45. Ramon A, Ornetti P. Dual energy computed tomography: A breakthrough for gout? *Joint Bone Spine*. 2020;87(4):289–291. doi: 10.1016/j.jbspin.2019.12.002
46. Shang J, Li XH, Lu SQ, et al. Gout of feet and ankles in different disease durations: Diagnostic value of single-source DECT and evaluation of urate deposition with a novel semi-quantitative DECT scoring system. *Adv Rheumatol*. 2021;61(1):1–14. doi: 10.1186/s42358-021-00194-4
47. Wang P, Smith SE, Garg R, et al. Identification of monosodium urate crystal deposits in patients with asymptomatic hyperuricemia using dual-energy CT. *RMD Open*. 2018;4(1):593–597. doi: 10.1136/rmdopen-2017-000593
48. Urano W, Yamanaka H, Tsutani H, et al. The inflammatory process in the mechanism of decreased serum uric acid concentrations during acute arthritis. *J Rheumatol*. 2002;29(9):1950–1953.
49. Dalbeth N, Nicolaou S, Baumgartner S, et al. Presence of monosodium urate crystal deposition by dual-energy CT in patients with gout treated with allopurinol. *Ann Rheum Dis*. 2018;77(3):364–370. doi: 10.1136/annrheumdis-2017-212046
50. Zhang W, Doherty M, Bardin T, et al. European league against rheumatism recommendations for calcium pyrophosphate deposition. Part I: Terminology and diagnosis. *Ann Rheum Dis*. 2011;70(4):563–570. doi: 10.1136/ard.2010.139105
51. Sabchysyn V, Konon I, Ryan LM, Rosenthal AK. Concurrence of rheumatoid arthritis and calcium pyrophosphate deposition disease: A case collection and review of the literature. *Semin Arthritis Rheum*. 2018;48(1):9–11. doi: 10.1016/j.semarthrit.2017.11.009
52. Williams CJ, Rosenthal AK. Pathogenesis of calcium pyrophosphate deposition disease. *Best Pract Res Clin Rheumatol*. 2021;35(4):101718. doi: 10.1016/j.berh.2021.101718
53. Abhishek A. Calcium pyrophosphate deposition. *Br J Hosp Med (Lond)*. 2014;75(4):61–64. doi: 10.12968/hmed.2014.75.sup4.c61
54. Miksanek J, Rosenthal AK. Imaging of calcium pyrophosphate deposition disease. *Curr Rheumatol Rep*. 2015;17(3):20. doi: 10.1007/s11926-015-0496-1
55. Godfrin-Valnet M, Godfrin G, Godard J, et al. Eighteen cases of crowned dens syndrome: Presentation and diagnosis. *Neurochirurgie*. 2013;59(3):115–120. doi: 10.1016/j.neuchi.2013.03.003
56. Cipolletta E, Filippou G, Scirè CA, et al. The diagnostic value of conventional radiography and musculoskeletal ultrasonography in calcium pyrophosphate deposition disease: a systematic literature review and meta-analysis. *Osteoarthritis Cartil*. 2021;29(5):619–632. doi: 10.1016/j.joca.2021.01.007
57. Lee KA, Lee SH, Kim HR. Diagnostic value of ultrasound in calcium pyrophosphate deposition disease of the knee joint. *Osteoarthritis Cartil*. 2019;27(5):781–787. doi: 10.1016/j.joca.2018.11.013
58. Neame RL, Carr AJ, Muir K, Doherty M. UK community prevalence of knee chondrocalcinosis: Evidence that correlation with osteoarthritis is through a shared association with osteophyte. *Ann Rheum Dis*. 2003;62(6):513–518. doi: 10.1136/ard.62.6.513
59. Frediani B, Filippou G, Falsetti P, et al. Diagnosis of calcium pyrophosphate dihydrate crystal deposition disease: Ultrasonographic criteria proposed. *Ann Rheum Dis*. 2005;64(4):638–640. doi: 10.1136/ard.2004.024109
60. Tanikawa H, Ogawa R, Okuma K, et al. Detection of calcium pyrophosphate dihydrate crystals in knee meniscus by dual-energy computed tomography. *J Orthop Surg Res*. 2018;13(1):73. doi: 10.1186/s13018-018-0787-0
61. Rosales-Alexander JL, Aznar JB, Magro-Checa C. Calcium pyrophosphate crystal deposition disease: Diagnosis and treatment. *Open Access Rheumatol*. 2014;(6):39–47. doi: 10.2147/OARRR.S39039
62. Sekijima Y, Yoshida T, Ikeda SI. CPPD crystal deposition disease of the cervical spine: A common cause of acute neck pain encountered in the neurology department. *J Neurol Sci*. 2010;296(1–2):79–82. doi: 10.1016/j.jns.2010.05.028
63. Kravchenko D, Karakostas P, Kuetting D, et al. The role of dual energy computed tomography in the differentiation of acute gout flares and acute calcium pyrophosphate crystal arthritis. *Clin Rheumatol*. 2022;41(1):223–233. doi: 10.1007/s10067-021-05949-4
64. Tedeschi SK, Solomon DH, Yoshida K, et al. A prospective study of dual-energy CT scanning, US and X-ray in acute calcium pyrophosphate crystal arthritis. *Rheumatology (Oxford)*. 2020;59(4):900–903. doi: 10.1093/rheumatology/kez431
65. Pascart T, Norberciak L, Legrand J, et al. Dual-energy computed tomography in calcium pyrophosphate deposition: Initial clinical experience. *Osteoarthritis Cartil*. 2019;27(9):1309–1314. doi: 10.1016/j.joca.2019.05.007

ОБ АВТОРАХ

*** Онойко Мария Викторовна;**

адрес: Россия, 119234, Москва, Ломоносовский пр-т, д. 27;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7727-3360>;
e-mail: onoykomary@gmail.com

Мершина Елена Александровна, канд. мед. наук, доцент;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1266-4926>;
eLibrary SPIN: 6897-9641; e-mail: elena_mershina@mail.ru

Георгина Ольга Анатольевна, канд. мед. наук, доцент;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7542-8189>;
eLibrary SPIN: 8331-3656; e-mail: olga.georginova@gmail.com

Плотникова Мария Леонидовна;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7533-9867>;
e-mail: maria_plotnikova@inbox.ru

Панюкова Александра Вадимовна;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5367-280X>;
e-mail: panyukovaalexandra@gmail.com

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5649-2193>;
eLibrary SPIN: 8449-6590; e-mail: vsini@mail.ru

AUTHORS' INFO

*** Maria V. Onoyko;**

address: 27 Lomonosovsky prospekt, 119234 Moscow, Russia;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7727-3360>;
e-mail: onoykomary@gmail.com

Elena A. Mershina, MD, Cand. Sci. (Med), Associate Professor;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1266-4926>;
eLibrary SPIN: 6897-9641; e-mail: elena_mershina@mail.ru

Olga A. Georginova, MD, Cand. Sci. (Med), Assistant Professor;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7542-8189>;
eLibrary SPIN: 8331-3656; e-mail: olga.georginova@gmail.com

Maria L. Plotnikova;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7533-9867>;
e-mail: maria_plotnikova@inbox.ru

Alexandra V. Panyukova;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5367-280X>;
e-mail: panyukovaalexandra@gmail.com

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5649-2193>;
eLibrary SPIN: 8449-6590; e-mail: vsini@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD322846>

Лучевые методы в диагностике первичной и рецидивной злокачественной струмы яичников: клинический случай

Н.В. Нуднов, С.В. Ивашина, С.П. Аксенова

Российский научный центр рентгенорадиологии, Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Представлено редкое клинко-диагностическое наблюдение первичной и рецидивной злокачественной струмы яичников.

Злокачественная струма правого яичника выявлена через 2 года после хирургического лечения первичной доброкачественной струмы левого яичника. Спустя полгода у пациентки выявлен рецидив заболевания, визуализируемый исключительно по данным радиоизотопных методов исследования. Визуализация рецидивных очагов по брюшине на ультразвуковом исследовании была отмечена на четвёртом году противоопухолевого лечения. По данным ультразвукового исследования, по брюшине малого таза на всём протяжении визуализировались множественные солидные опухолевые очаги изо-гипоэхогенной структуры с наличием локусов низко- и умеренно скоростного кровотока даже в мелких очагах: скорость кровотока (peak systolic velocity, PS) была в диапазоне от 2 до 9 см/сек, максимальный индекс сосудистого сопротивления (resistivity index, RI max) — 0,53. На протяжении 4 лет пациентке проводилась радиойодтерапия ¹³¹I активностью 6,0 ГБк. Состояние пациентки на фоне проводимого лечения удовлетворительное.

Ключевые слова: ультразвуковое исследование; трёхмерная ангиография; ультразвуковая томография; энергетическое доплеровское картирование; МРТ; рецидив; злокачественная струма яичника; перитонеальный струмоз.

Как цитировать

Нуднов Н.В., Ивашина С.В., Аксенова С.П. Лучевые методы в диагностике первичной и рецидивной злокачественной струмы яичников: клинический случай // *Digital Diagnostics*. 2023. Т. 4, № 2. С. 214–225. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD322846>

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD322846>

Radiation methods in the diagnosis of primary and recurrent malignant ovarian struma: A case report

Nikolai V. Nudnov, Svetlana V. Ivashina, Svetlana P. Aksenova

Russian Scientific Center of Roentgenradiology, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

We provide a rare clinical and diagnostic observation of primary and recurring malignant ovarian struma.

Malignant struma of the right ovary was detected 2 years after surgical treatment of primary benign struma of the left ovary. Six months later, the patient was diagnosed with a disease relapse, visualized exclusively according to radioisotope research methods. In the fourth year of anticancer treatment, ultrasonography revealed recurring foci along the peritoneum. According to the ultrasound data on the pelvic peritoneum and the projection of the removed right ovary, multiple solid nodes with high blood flow were visualized. Peak systolic velocity ranged from 2 to 9 cm/s in minor lesions from 4 to 12 mm, with an RI max of 0.53. For 4 years, the patient underwent radioiodine therapy with ^{131}I with an activity of 6.0 GBq; the patient's condition during the treatment was satisfactory.

Keywords: 3D angiography; magnetic resonance imaging; malignant struma ovarii; peritoneal strumosis; power Doppler mapping; relapse; ultrasound; ultrasound tomography.

To cite this article

Nudnov NV, Ivashina SV, Aksenova SP. Radiation methods in the diagnosis of primary and recurrent malignant ovarian struma: A case report. *Digital Diagnostics*. 2023;4(2):214–225. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD322846>

Received: 12.04.2023

Accepted: 16.05.2023

Published: 30.05.2023

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD322846>

放射治疗方法在原发性和复发性恶性卵巢甲状腺肿诊断中的应用：临床病例

Nikolai V. Nudnov, Svetlana V. Ivashina, Svetlana P. Aksenova

Russian Scientific Center of Roentgenradiology, Moscow, Russian Federation

简评

本文介绍了一个罕见的原发性和复发性恶性卵巢甲状腺肿的临床诊断观察。

右侧卵巢的恶性甲状腺肿是在左侧卵巢的原发性良性甲状腺肿手术治疗2年后发现的。6个月後，患者出现了只有放射性同位素技术数据才能观察到的疾病复发。在抗肿瘤治疗的第四年，超声检查发现了复发的腹膜病灶。根据超声检查，在全体盆腔腹膜上可以看到多个等渗及低回声结构的实体肿瘤病灶，存在低到中等速度的血流病灶，即使是小病灶：血流速度（peak systolic velocity, PS）在2到9cm/s之间，最大血管阻力指数（resistivity index, RI max）为0.53。患者曾接受放射性碘治疗¹³¹I，活性为6.0GBq，治疗了4年。在治疗的背景下，患者的情况是令人满意的。

关键词：超声检查；三维血管造影；超声层析成像；能量多普勒成像；MRI；复发；恶性卵巢甲状腺肿；腹膜甲状腺肿。

To cite this article

Nudnov NV, Ivashina SV, Aksenova SP. 放射治疗方法在原发性和复发性恶性卵巢甲状腺肿诊断中的应用：临床病例. *Digital Diagnostics*. 2023;4(2):214–225. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD322846>

收到: 12.04.2023

接受: 16.05.2023

发布日期: 30.05.2023

ВВЕДЕНИЕ

Злокачественная струма яичников — редкое заболевание, которое относится к группе монодермальных тератом и органоидных опухолей, которые формируются из дермоидных кист, согласно классификации Всемирной организации здравоохранения (WHO Classification of Tumours, 2020) [1].

Важные открытия по этому вопросу были сделаны ещё в конце XIX века. Так, присутствие ткани щитовидной железы в яичнике впервые описал Ричард Беттлин (Richard Böttlin) в 1889 году, а струму яичников — Клеменс фон Кальден (Clemens von Kalden) в 1895 году. Термин «struma ovarii colloides» вошёл в обиход в 1903 году благодаря Юлиусу Роберту фон Майеру (Julius Robert von Meyer). Тогда же Людвиг Пик (Ludwig Pick) предположил, что тиреоидные элементы в «яичниковом зобе» могут подвергаться различной трансформации. Постепенно в яичниковой струме был описан весь спектр патологии щитовидной железы, включая узловой и токсический зоб, аутоиммунный тиреоидит, аденомы, карциномы [2, 3].

Струма яичника в 90–95% случаев является доброкачественным образованием, и карцинома в её структуре встречается крайне редко. Найденные клинико-диагностические наблюдения злокачественной струмы яичника носят преимущественно описательный характер [3–11].

Важность своевременной диагностики вида струмы яичника играет ключевую роль у пациенток репродуктивного периода, планирующих сохранение фертильности, так как объём проводимого хирургического лечения будет разным при разных гистологических вариантах данного заболевания. Если при доброкачественной струме яичника будут рассматриваться лапароскопическая техника овариоэктомии или резекция яичника, то злокачественная струма яичника потребует удаления матки с придатками, резекции большого сальника [8]. В научных публикациях показано, что средний временной интервал от первоначального диагноза струмы яичников (доброкачественной или злокачественной) до метастатической фазы злокачественной струмы составляет от 2 до 9 лет [2].

Учитывая, что зоб яичника является новообразованием, а не гипертрофией стромы яичника, как это наблюдается в щитовидной железе, его диссеминация и метастатический потенциал в другие органы подтверждают точку зрения, приведённую в последней классификации опухолей женских половых органов Всемирной организации здравоохранения 2020 года: «перитонеальные имплантаты высокодифференцированной ткани щитовидной железы у пациента с гистологически доброкачественной струмой яичника, известной как «струмоз», в настоящее время считаются метастазом высокодифференцированной фолликулярной карциномы, возникающей в струме яичника» [1, 12]. Отмечено также,

что пятилетняя выживаемость пациенток, получающих лечение радиоактивным йодом (йод-131, ¹³¹I), была выше, чем у пациенток без лечения (94,9 против 64,8%) [4, 10].

Анализируя медицинские источники информации (Pubmed, Medline), найдены единичные исследования семиотики злокачественной струмы яичника и рецидивного перитонеального струмоза ультразвуковым (УЗИ) или методом магнитно-резонансной томографии (МРТ), при этом описательная картина заболеваний с особенностями перфузионных характеристик носит противоречивые данные, что и послужило поводом к написанию данной статьи.

ОПИСАНИЕ СЛУЧАЯ

О пациенте

В работе изучены особенности клинического случая первичной и рецидивной злокачественной струмы яичников стадии T3cN0M0 у пациентки Р. в возрасте 25 лет.

Пациентка Р. через месяц после родов была прооперирована по поводу доброкачественной струмы левого яичника, дермоидной кисты правого яичника в объёме левосторонней овариоэктомии и резекции правого яичника. В течение 2 лет патологии выявлено не было. В 2015 году в другом лечебном учреждении по поводу асцита и увеличения яичников проведены диагностическая лапароскопия, биопсия очагов по брюшине. В ФГБУ «Российский научный центр рентгенодиагностики» Минздрава России (РНЦРР) проведён пересмотр стёкол препаратов (низкодифференцированная злокачественная струма яичников). В анализах крови от 2015 года тиреоглобулин 35 156 нг/мл (норма 0–50); антитела к тиреоглобулину 0,52 Ед/мл; тиреотропный гормон 0,76 нг/мл (норма <0,2); тироксин 0,69 пмоль/л; белок СА-125 1339,5 Ед/мл; хорионический гонадотропин человека 1,2 нЕд/мл; альфафетопrotein 2,25 МЕ/мл.

Результаты инструментального исследования

После диагностической лапароскопии и биопсии очагов по брюшине малого таза, выполненных в другом лечебном учреждении, в РНЦРР проведено комплексное УЗИ, по данным которого выявлены неоднородное изогипоэхогенное образование с зонами анэхогенной структуры неправильной и округлой формы в проекции правых придатков с выраженным патологическим кровотоком в структуре солидного компонента образования, асцит, канцероматоз брюшины малого таза. На рис. 1 представлена трёхмерная ангиография первичной злокачественной струмы правого яичника.

УЗИ органов малого таза выполнено на ультразвуковом аппарате eSaote Pro (использованы трансвагинальный и объёмный трансвагинальный датчики). УЗИ выполняли в стандартном 2D-режиме, затем применяли высокотехнологические ультразвуковые

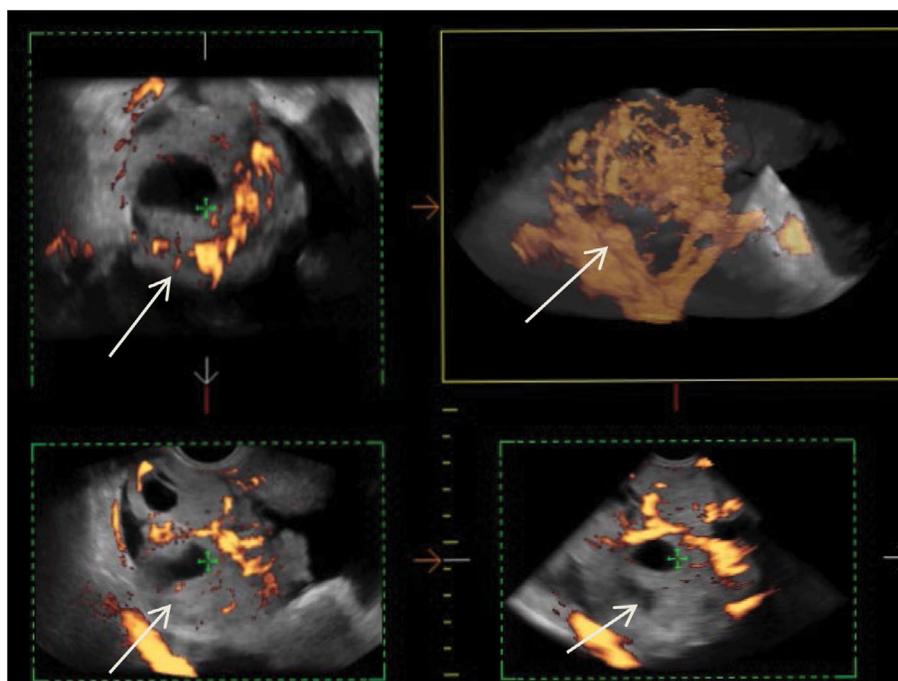


Рис. 1. 3D-ангиография низкодифференцированной злокачественной струмы правого яичника (стрелки).

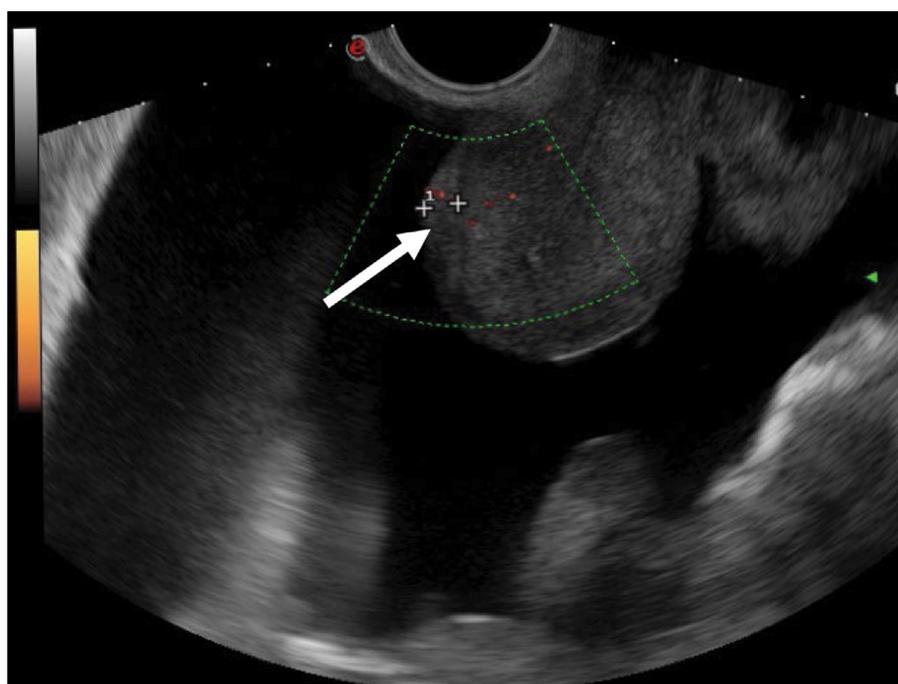


Рис. 2. Допплерограмма в энергетическом режиме. Злокачественная струма яичников. Канцероматоз брюшины малого таза клепреди от матки (стрелка). Опухолевый очаг на изображении имеет размер толщиной 6 мм.

методы (энергетическое доплеровское картирование, УЗ-томографию, 3D-ангиографию).

На рис. 2 визуализируется неравномерное утолщение брюшины малого таза, покрывающей переднюю стенку матки. Структура бластоматозно изменённой брюшины малого таза изо-гипоэхогенная, контуры на границе с телом матки нечёткие.

Необходимо отметить выраженность кровотока в опухолевом очаге в дугласовом пространстве и его

сглаженность в утолщённой (до 5–7 мм) брюшине малого таза (рис. 3).

В дополнение к УЗИ была проведена мультипараметрическая МРТ органов малого таза на высокопольном томографе с напряжённостью магнитного поля 1,5 Тесла. МР-исследование соответствовало рекомендациям Европейского общества урогенитальных радиологов (ESUR Guidelines, 2019) и включало несколько режимов: T2-ВИ (T2-взвешенные изображения), T1-ВИ (T1-взвешенные

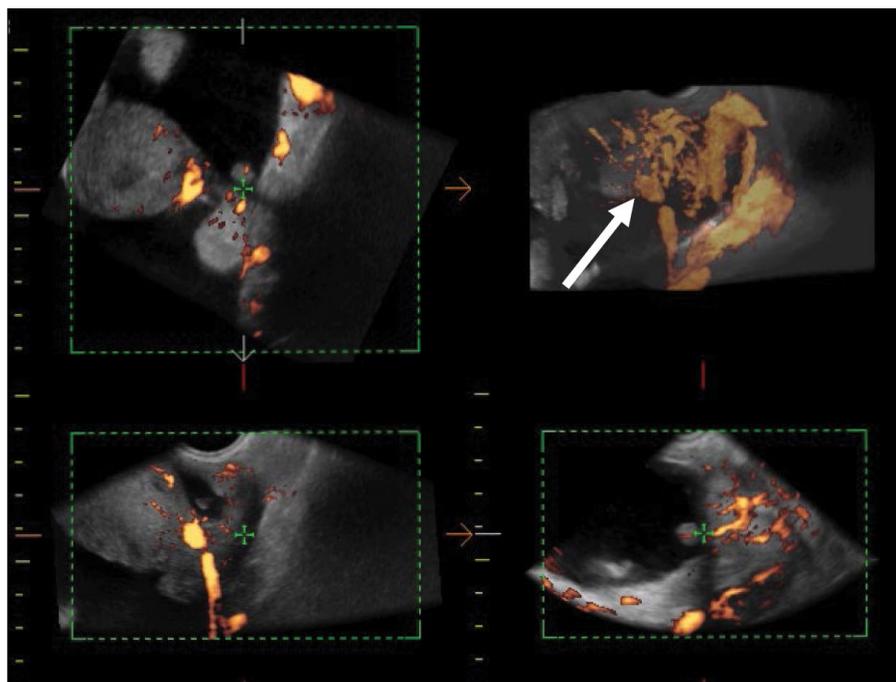


Рис. 3. 3D-ангиография опухолевого очага злокачественной струмы по брюшине в позадиматочном пространстве (указан стрелкой).

изображения), DWI (взвешенные по диффузии изображения; $b=800$, $b=1400$), T1 с динамическим контрастным усилением [13].

Первичная визуализация злокачественной струмы яичника на МРТ характеризовалась наличием объёмного преимущественно-солидного образования правого яичника с неровными нечёткими бугристыми контурами, участками множественных кистозных включений размером от 0,7 до 3 см с неоднородно повышенным МР-сигналом на T1-ВИ, неоднородным (от гипер- до гипо-) МР-сигналом на T2-ВИ, что соответствовало коллоидным узлам с разным по вязкости высокобелковым содержимым. Солидные участки опухоли характеризовались разными показателями рестрикции диффузии — от 0,7 до $1,4 \text{ мм}^2/\text{сек} \times 10^{-3}$. Определялись также множественные узловы образования по брюшине малого таза и диффузное утолщение брюшины. Накопление парамагнетика в опухолевом узле, по брюшине и в узлах брюшины было резко повышенное на T1-ВИ с подавлением сигнала от жировой ткани (рис. 4). В то же время на сагиттальных постконтрастных изображениях чётко видно отсутствие накопления парамагнетика в коллоидных узлах злокачественной струмы правого яичника (см. рис. 4, f).

По данным УЗИ, свободная жидкость в малом тазу в объёме 5–10 мл была выявлена через 3 месяца после проведённого хирургического этапа лечения: экстирпации матки с правыми придатками, оментэктомии, тиреоидэктомии. На протяжении 4 лет свободная жидкость, по результатам комплексного УЗИ, сохранялась на фоне проводимой радиойодтерапии (^{131}I , 6,0 ГБк, суммарно 11 курсов), однако очагов не было выявлено. Первые очаги рецидива основного заболевания по брюшине

малого таза, визуализируемые по данным УЗИ, появились через 4 года от начала комплексного лечения.

По данным УЗИ, рецидивные очаги злокачественной струмы яичника по брюшине малого таза, выявленные на фоне асцита, имели изо-гипоэхогенную структуру без чётких контуров и небольшой размер (от 4 до 12 мм). Брюшина малого таза вне очагов была толщиной менее 4 мм, однако при проведении 3D-ангиографии и УЗ-томографии было выявлено, что даже мелкие blastomatosные очаги были хорошо васкуляризованы. Кровоток регистрировался также в структуре брюшины малого таза, толщина которой была около 4–5 мм (рис. 5–7).

С целью выявления специфических семиотических УЗ-признаков злокачественной струмы яичника было проведено сравнение рецидивных опухолевых очагов по брюшине злокачественной струмы одного клинического случая с рецидивными очагами серозной аденокарциномы яичника 12 пациенток. Сравнивая опухолевые очаги в позадиматочном пространстве, необходимо отметить более выраженный неоангиогенез в опухолевом очаге злокачественной струмы яичников, где скорость кровотока (peak systolic velocity, PS) регистрировалась в малых очагах (от 4 до 12 мм) и была в диапазоне от 2 до 9 см/сек, максимальный индекс сосудистого сопротивления (resistivity index, RI max) — 0,53. Кровоток в рецидивных очагах по брюшине малого таза серозной аденокарциномы до 9 мм не регистрировался, а в очагах до 15–20 мм скорость кровотока варьировала в диапазоне от 2 до 4 см/сек и менее 2 см/сек (рис. 5, 8).

Таким образом, обобщая вышесказанное, в представленном наблюдении сочетанная визуализация тиреоидной ткани (коллоидных узлов), зон ограничения

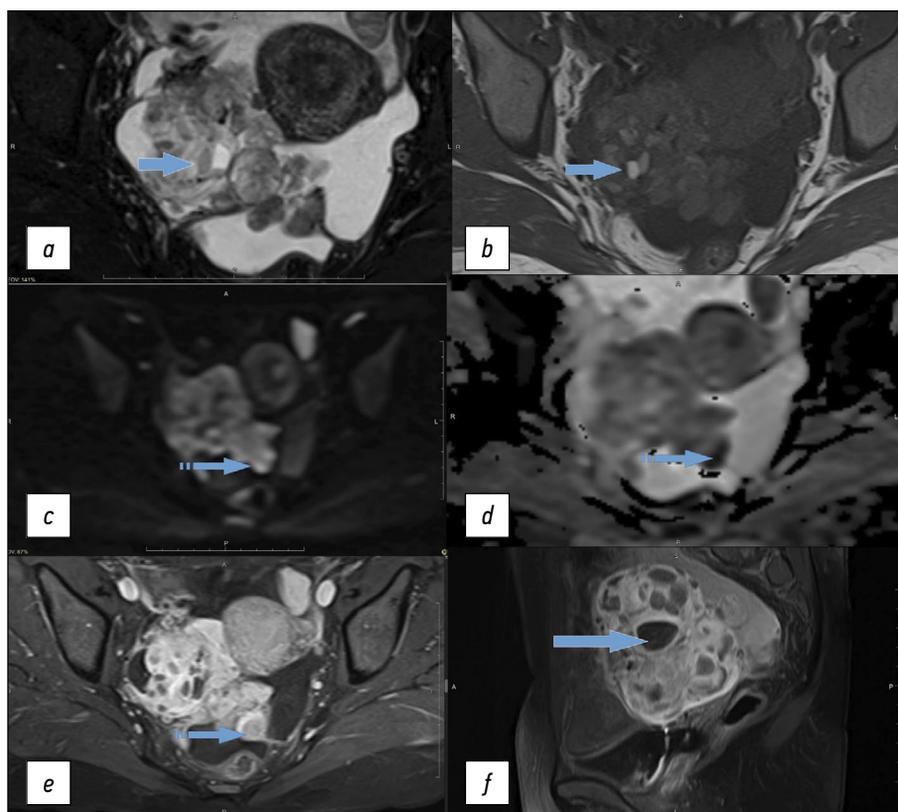


Рис. 4. Магнитно-резонансная томография органов малого таза у пациентки Р. со злокачественной струмой правого яичника: *a* — T2-FS-VI в аксиальной плоскости; *b* — T1-VI в аксиальной плоскости; *c* — DWI ($b=1000$); *d* — ADC-карта; *e* — T1-FS-VI + контраст в аксиальной плоскости; *f* — T1-FS-VI + контраст в сагиттальной плоскости. Сплошной стрелкой отмечены коллоидные узлы в злокачественной струме яичника правого яичника; пунктирной стрелкой — очаги по брюшине таза с повышенным накоплением парамагнетика и рестрикцией диффузии аналогично солидному компоненту основной опухоли.

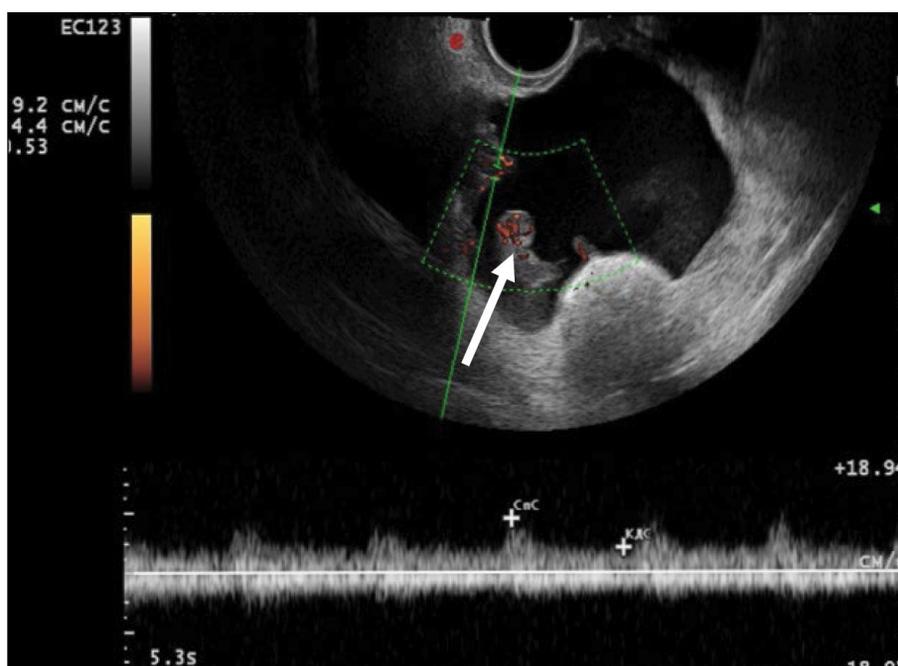


Рис. 5. Допплерограмма в энергетическом режиме. Рецидивные очаги злокачественной струмы яичников отмечены стрелкой.

диффузии и повышенного накопления парамагнетика в её солидном компоненте на МРТ могут быть проявлением злокачественной струмы яичника. Рецидивные очаги злокачественной струмы, даже мелкие (до 4–5 мм), хорошо

васкуляризованы. Злокачественная струма правого яичника выявлена через 2 года после хирургического лечения первичной доброкачественной струмы левого яичника.

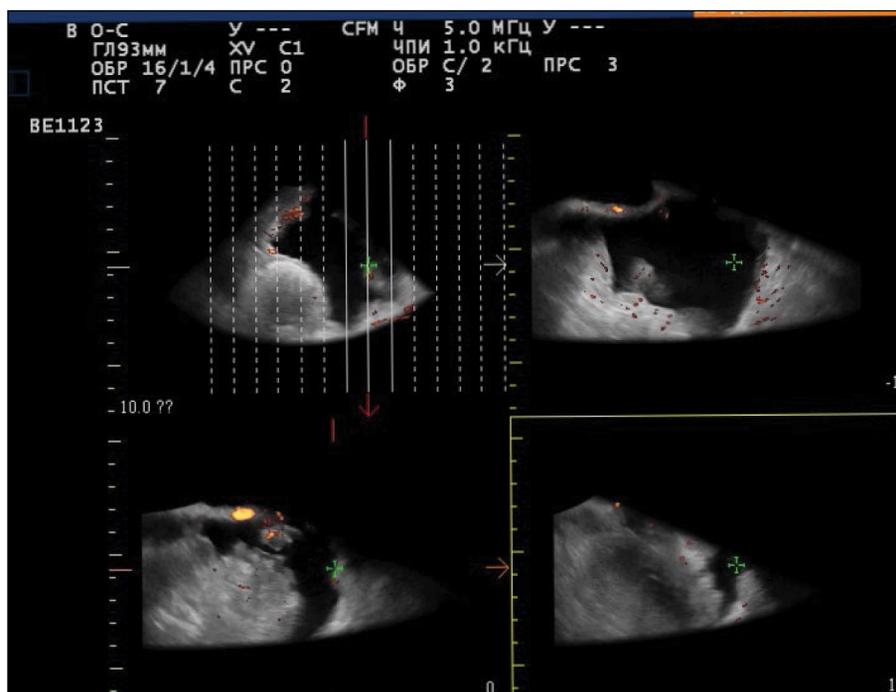


Рис. 6. Ультразвуковая томография рецидивных очагов злокачественной струмы яичников.

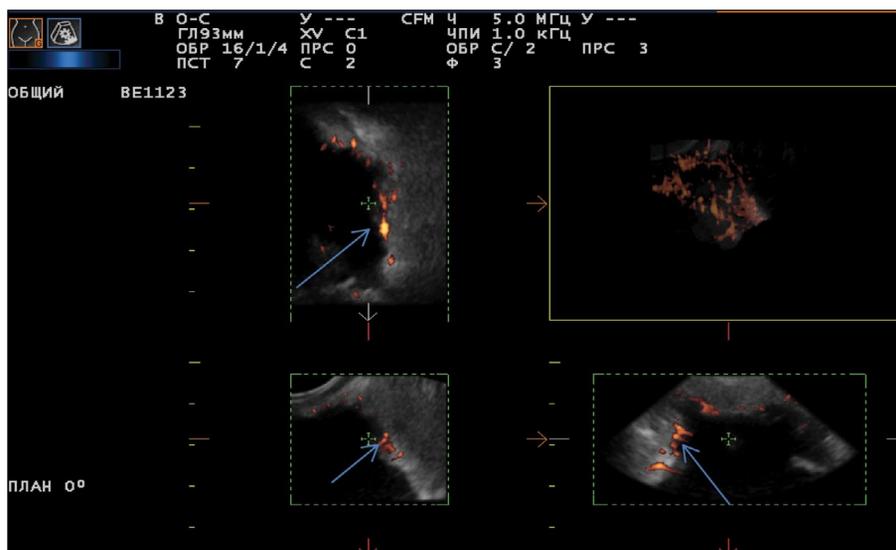


Рис. 7. 3D-ангиография рецидивных очагов злокачественной струмы по брюшине малого таза на фоне асцита.

Соматическое состояние пациентки не усугубляется на фоне асцита и сохраняющихся рецидивных очагов в малом тазу.

ОБСУЖДЕНИЕ

Настоящая работа посвящена анализу семиотической УЗ- и МР-картины первичной и рецидивной злокачественной струмы яичника. Наши данные в целом совпадают в описанными в литературе единичными наблюдениями данного новообразования. Так, злокачественная струма яичника при УЗИ представлена мультикистозной опухолью с неправильными перегородками и неоднородными

эзогенными солидными компонентами внутри. Результаты комплексного УЗИ (энергетическое доплеровское картирование, УЗ-томография, 3D-ангиография) показывают выраженный неангиогенез как первичной злокачественной струмы, так и мелких рецидивных очагов злокачественной струмы яичника. Характерным признаком является наличие так называемых жемчужин струмы (struma pearl) — очерченных округлых и солидных областей с ровными контурами, которые соответствуют богатой коллоидами ткани щитовидной железы [8, 14–17].

В нашем наблюдении опухоль не показала типичных семиотических МР-признаков для злокачественной струмы яичника, в то же время на МРТ можно заподозрить

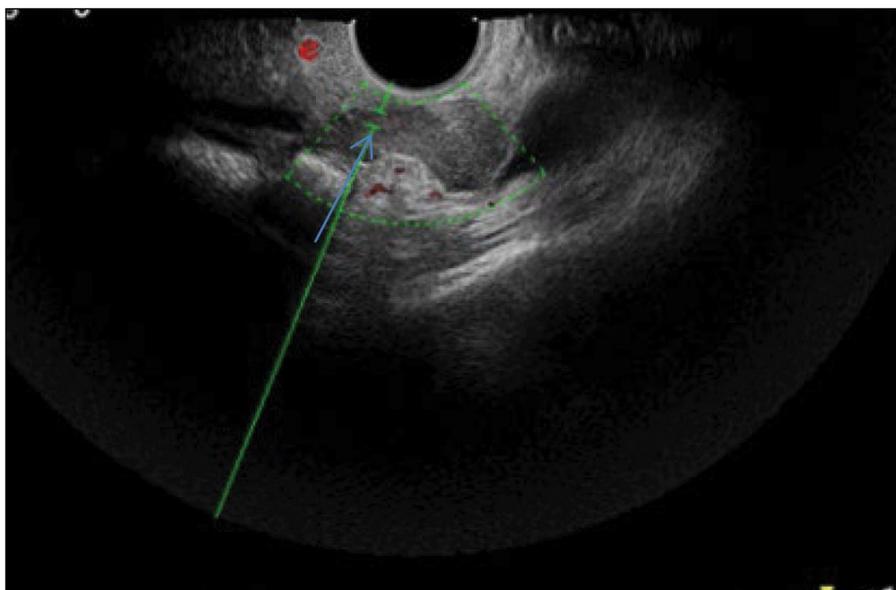


Рис. 8. Допплерограмма в энергетическом режиме опухолевого очага по брюшине в позадиматочном пространстве у пациентки с серозным раком яичников стадии IIIС.

наличие включений коллоидных узлов в ткани щитовидной железы в структуре солидного компонента опухоли яичника. Отмечалось наличие разной степени выраженности ограничения диффузии в солидном компоненте опухоли и очагах по брюшине таза. Патогномичным было крайне выраженное накопление парамагнетика на постконтрастных сериях в солидном компоненте опухоли и отсутствие накопления в коллоидных узлах. В исследовании R. Gil и соавт. [14] на МР-изображениях струмы яичников визуализировались как мультикистозные опухоли с солидными компонентами, часто с высокой интенсивностью сигнала на T1-ВИ, в то время как кисты имели различную интенсивность сигнала на T2-ВИ в зависимости от вязкости жидкости. В исследовании N. Tamura и соавт. [17], проанализировавших 18 случаев струмы яичников, лишь в 54% наблюдений на МРТ был выявлен солидный участок, который накапливал контрастный препарат и соответствовал злокачественному варианту опухоли, в то же время рестрикция диффузии установлена лишь в 11% наблюдений.

В нашем исследовании рестрикция диффузии была неоднородная, но всё же позволяла высказаться в пользу злокачественного характера процесса, как и перфузионные показатели в опухоли. Данные, аналогичные нашим, получены в исследовании S. Yamauchi и соавт. [7]: солидный компонент в злокачественной струме яичника характеризовался повышенным МР-сигналом на DWI и сниженным сигналом на ADC-картах. Так, при сопоставлении с патоморфологическим исследованием именно участки злокачественной папиллярной струмы яичника соответствовали зонам истинного ограничения диффузии на МРТ.

В настоящей работе нами было проведено сравнение рецидивных очагов злокачественной струмы и серозного рака яичников. Необходимо отметить, что по структуре

рецидивные очаги злокачественной струмы были схожи с серозным раком яичников и имели изо-гипоэхогенную структуру, однако по данным УЗ-ангиографии и УЗ-томографии при серозном раке яичников в очагах 4–5 мм кровотока не регистрировался. Важно подчеркнуть, что при серозном раке яичников в структуре брюшины малого таза менее 4 мм мы не регистрировали локусы кровотока. В научной работе R. Ranade и соавт. [19] у пациентки через 6 лет после хирургического лечения струмы яичников при УЗИ выявлен перитонеальный струмоз (struma peritonei), при этом очаги имели смешанную структуру с наличием кальцинатов.

В научной публикации С. Brogsitter и соавт. [20] описан клинический случай перитонеального струмоза и указана роль гистологического исследования из-за схожести с карциномой яичника. Многие аспекты перитонеального струмоза остаются неизученными, однако авторы предполагают связь либо с разрывом зрелой тератомы яичника, либо с резекцией яичников по поводу зрелой тератомы яичника. Авторы отмечают также «вялое» течение перитонеального струмоза [20]. Немаловажно отметить, что и в нашем клиническом случае на протяжении 3 лет с момента выявления множественных очагов по брюшине не происходило ухудшения соматического состояния пациентки, несмотря на слабopоложительную динамику на фоне радиойодтерапии. В исследованных базах данных не выявлено актуальных наблюдений рецидива злокачественной струмы яичника — перитонеального струмоза — по данным МРТ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Злокачественную струму яичника довольно сложно диагностировать на дооперационном этапе. Несмотря

на то, что струму яичника трудно отличить от аденокарциномы яичника, использование УЗИ и МРТ может быть полезно для дифференциальной диагностики данных нозологий.

В заключение можно суммировать, что сочетанная визуализация тиреоидной ткани и зон ограничения диффузии в её солидном компоненте на МРТ могут быть проявлением злокачественной струмы яичника. Проведённое исследование показало, что даже небольшие рецидивные опухолевые очаги злокачественной струмы яичника по брюшине малого таза (размером до 4–5 мм) хорошо васкуляризованы, в отличие от серозного рака яичников, и могут быть выявлены с помощью методик ультразвуковой объёмной реконструкции изображения в ангиорежиме.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении поисково-аналитической 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 поисково-аналитической работы и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший

вклад распределён следующим образом: Нуднов Н.В. — концепция и дизайн работы; согласование окончательного варианта текста; Ивашина С.В. — написание текста статьи, анализ результатов, подготовка иллюстраций; Аксенова С.П. — написание текста статьи, анализ результатов, подготовка иллюстраций; редактирование рукописи.

Информированное согласие на публикацию. Авторы получили письменное согласие пациентки 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. Nudnov N.V. — concept and design of the work; agreement on the final version of the text; Ivashina S.V. — writing the text of the article, analysis of the results, preparation of illustrations; Aksenova S.P. — writing the text of the article, analysis the results, preparing illustrations; manuscript 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. Female Genital Tumours. WHO Classification of Tumours, 5th Edition, vol. 4. WHO Classification of Tumours Editorial Board, 2020. Режим доступа: <https://publications.iarc.fr/Book-And-Report-Series/Who-Classification-Of-Tumours/Female-Genital-Tumours-2020>. Дата обращения: 15.04.2023.
2. Li S., Yang T., Li X. FIGO stage IV and age over 55 years as prognostic predictors in patients with metastatic malignant struma ovarii // *Front Oncol*. 2020. N 10. P. 584917. doi: 10.3389/fonc.2020.584917
3. Roth L.M., Karseladze A.I. Highly differentiated follicular carcinoma arising from struma ovarii: A report of 3 cases, a review of the literature, and a reassessment of so-called peritoneal strumosis // *Int J Gynecol Pathol*. 2008. Vol. 27, N 2. P. 213–222. doi: 10.1097/PGP.0b013e318158e958
4. Ayhan S., Kilic F., Ersak B., et al. Malignant struma ovarii: From case to analysis // *J Obstet Gynaecol Res*. 2021. Vol. 47, N 9. P. 3339–3351. doi: 10.1111/jog.14902
5. Kanasugi M., Nishiyama H., Sanpei M., et al. Ovarian strumal carcinoid: A case report // *Fukushima J Med Sci*. 2023. Vol. 69, N 1. P. 51–55. doi: 10.5387/fms.2022-22
6. Smith L.P., Brubaker L.W., Wolsky R.J. It does exist! Diagnosis and management of thyroid carcinomas originating in struma ovarii // *Surg Pathol Clin*. 2023. Vol. 16, N 1. P. 75–86. doi: 10.1016/j.path.2022.09.008
7. Yamauchi S., Kokabu T., Kataoka H., et al. Computed tomography, magnetic resonance imaging, and positron emission tomography/computed tomography findings for the diagnosis of malignant struma ovarii: A case report // *J Obstet Gynaecol Res*. 2023. Vol. 49, N 5. P. 1456–1461. doi: 10.1111/jog.15619
8. Yazawa R., Yazawa H., Fukuda K., Ohara M. Struma ovarii with massive ascites mimicking ovarian carcinoma treated with conservative laparoscopic surgery: A case report // *Fukushima J Med Sci*. 2023. Vol. 69, N 1. P. 37–43. doi: 10.5387/fms.2022-30
9. Shou L., Lu J., Yang J., et al. Follicular carcinoma originating from struma ovarii: A case report // *Medicine (Baltimore)*. 2023. Vol. 102, N 1. P. e32658. doi: 10.1097/MD.00000000000032658
10. Elshafie O., Hussein S., Al Kalbani M., et al. Papillary follicular variant thyroid cancer in a malignant struma ovarii: A report of a rare case // *Endocrinol Diabetes Metab Case Rep*. 2022. Vol. 2022. P. 21-0169. doi: 10.1530/EDM-21-0169
11. Антонова И.Б., Фомин Д.К., Бабаева Н.А., и др. Злокачественная струма яичников. Обзор литературы и собственное наблюдение редкого варианта опухоли // *Трудный пациент*. 2018. Т. 16, № 8-9. С. 16–18.
12. Giannopoulos E., Saliaris K., Kavoura E., et al. Highly differentiated follicular carcinoma of ovarian origin: A systematic review of the literature // *Curr Oncol*. 2022. Vol. 29, N 12. P. 9105–9116. doi: 10.3390/currenol29120712

13. ResearchGate GmbH [интернет]. Alt C., Bharwani N., Brunesch L., et al.; ESUR Female Pelvis Imaging Working Group. Esur quick guide to female pelvis imaging [cite July 2019]. Режим доступа: https://www.esur.org/fileadmin/content/2019/ESUR_2019_ESUR_Quick_Guide_to_Female_Pelvis_Imaging.pdf. Дата обращения: 15.04.2023.
14. Gil R., Cunha T.M., Rolim I. Mature cystic teratoma with high proportion of solid thyroid tissue: A controversial case with unusual imaging findings // *J Radiol Case Rep*. 2017. Vol. 11, N 7. P. 20–30. doi: 10.3941/jrcr.v11i7.2853
15. Озерская И.А., Чекалова М.А., Иванов В.А., Казарян Г.Г. Ультразвуковые признаки опухолей яичников по стандартизованному протоколу // *Медицинская визуализация*. 2023. Т. 27, № 2. С. 110–124. doi: 10.24835/1607-0763-1144
16. Fujiwara S., Tsuyoshi H., Nishimura T., et al. Precise preoperative diagnosis of struma ovarii with pseud-Meigs' syndrome mimicking ovarian cancer with the combination of ¹³¹I scintigraphy and 18F-FDG

- PET: Case report and review of the literature // *J Ovarian Res*. 2018. Vol. 11, N 1. P. 11. doi: 10.1186/s13048-018-0383-2
17. Savelli L., Testa A.C., Timmerman D., et al. Imaging of gynecologic disease (4): Clinical and ultrasound characteristics of struma ovarii. *Ultrasound Obstet Gynecol*. 2008. Vol. 32, N 2. P. 210–219. doi: 10.1002/uog.5396
18. Tamura N., Murakami K., Ozaki R., et al. Current state of management of struma ovarii and preoperative imaging features: A retrospective case series study of 18 patients at a single institution // *J Obstet Gynaecol Res*. 2023. Vol. 49, N 3. P. 1007–1011. doi: 10.1111/jog.15545
19. Ranade R., Rachh S., Basu S. Late manifestation of struma ovarii and widespread functioning lesions in the setting of struma ovarii simulating highly differentiated follicular carcinoma // *J Nucl Med Technol*. 2015. Vol. 43, N 3. P. 231–233. doi: 10.2967/jnmt.114.149294
20. Brogssitter C., Wonsak A., Würll K., Kotzerke J. Peritoneal strumosis // *Eur J Nucl Med Mol Imaging*. 2004. Vol. 31, N 7. P. 1057. doi: 10.1007/s00259-004-1548-3

REFERENCES

1. Female Genital Tumours. WHO Classification of Tumours, 5th Edition, vol. 4. WHO Classification of Tumours Editorial Board; 2020. Available from: <https://publications.iarc.fr/Book-And-Report-Series/Who-Classification-Of-Tumours/Female-Genital-Tumours-2020>. Accessed: 15.04.2023.
2. Li S, Yang T, Li X. FIGO stage IV and age over 55 years as prognostic predictors in patients with metastatic malignant struma ovarii. *Front Oncol*. 2020;(10):1983. doi: 10.3389/fonc.2020.584917
3. Roth LM, Karseladze AI. Highly differentiated follicular carcinoma arising from struma ovarii: A report of 3 cases, a review of the literature, and a reassessment of so-called peritoneal strumosis. *Int J Gynecol Pathol*. 2008;27(2):213–222. doi: 10.1097/PGP.0b013e318158e958
4. Ayhan S, Kilic F, Ersak B, et al. Malignant struma ovarii: From case to analysis *J Obstet Gynaecol Res*. 2021;47(9):3339–3351. doi: 10.1111/jog.14902
5. Kanasugi M, Nishiyama H, Sanpei M, et al. Ovarian strumal carcinoid: A case report. *Fukushima J Med Sci*. 2023;69(1):51–55. doi: 10.5387/fms.2022-22
6. Smith LP, Brubaker LW, Wolsky RJ. It does exist! Diagnosis and management of thyroid carcinomas originating in struma ovarii. *Surg Pathol Clin*. 2023;16(1):75–86. doi: 10.1016/j.path.2022.09.008
7. Yamauchi S, Kokabu T, Kataoka H, et al. Computed tomography, magnetic resonance imaging, and positron emission tomography/computed tomography findings for the diagnosis of malignant struma ovarii: A case report. *J Obstet Gynaecol Res*. 2023;49(5):1456–1461. doi: 10.1111/jog.15619
8. Yazawa R, Yazawa H, Fukuda K, Ohara M. Struma ovarii with massive ascites mimicking ovarian carcinoma treated with conservative laparoscopic surgery: A case report. *Fukushima J Med Sci*. 2023;69(1):37–43. doi: 10.5387/fms.2022-30
9. Shou L, Lu J, Yang J, et al. Follicular carcinoma originating from struma ovarii: A case report. *Medicine (Baltimore)*. 2023;102(1):e32658. doi: 10.1097/MD.00000000000032658
10. Elshafie O, Hussein S, Al Kalbani M, et al. Papillary follicular variant thyroid cancer in a malignant struma ovarii: A report of a rare case. *Endocrinol Diabetes Metab Case Rep*. 2022;2022:21-0169. doi: 10.1530/EDM-21-0169
11. Antonova IB, Fomin DK, Babaeva NA, et al. Malignant ovarian stroma. Literature review and own observation of a rare variant of the tumor. *Difficult Patient*. 2018;16(8-9):16–18. (In Russ).
12. Giovannopoulou E, Saliaris K, Kavoura E, et al. Highly differentiated follicular carcinoma of ovarian origin: A systematic review of the literature. *Curr Oncol*. 2022;29(12):9105–9116. doi: 10.3390/curroncol29120712
13. ResearchGate GmbH [Internet]. Alt C, Bharwani N, Brunesch L, et al.; ESUR Female Pelvis Imaging Working Group. Esur quick guide to female pelvis imaging [cite July 2019]. Available from: https://www.esur.org/fileadmin/content/2019/ESUR_2019_ESUR_Quick_Guide_to_Female_Pelvis_Imaging.pdf. Accessed: 15.04.2023.
14. Gil R, Cunha TM, Rolim I. Mature cystic teratoma with high proportion of solid thyroid tissue: A controversial case with unusual imaging findings. *J Radiol Case Rep*. 2017;11(7):20–30. doi: 10.3941/jrcr.v11i7.2853
15. Ozerskaya IA, Chekalova MA, Ivanov VA, Kazaryan GG. Ultrasound signs of ovarian tumors according to a standardized protocol. *Medical Imaging*. 2023;27(2):110–124. (In Russ). doi: 10.24835/1607-0763-1144
16. Fujiwara S, Tsuyoshi H, Nishimura T, et al. Precise preoperative diagnosis of struma ovarii with pseud-Meigs' syndrome mimicking ovarian cancer with the combination of ¹³¹I scintigraphy and 18F-FDG PET: Case report and review of the literature. *J Ovarian Res*. 2018;11(1):11. doi: 10.1186/s13048-018-0383-2
17. Savelli L, Testa AC, Timmerman D, et al. Imaging of gynecologic disease (4): Clinical and ultrasound characteristics of struma ovarii. *Ultrasound Obstet Gynecol*. 2008;32(2):210–219. doi: 10.1002/uog.5396
18. Tamura N, Murakami K, Ozaki R, et al. Current state of management of struma ovarii and preoperative imaging features: A retrospective case series study of 18 patients at a single institution. *J Obstet Gynaecol Res*. 2023;49(3):1007–1011. doi: 10.1111/jog.15545
19. Ranade R, Rachh S, Basu S. Late Manifestation of struma ovarii and widespread functioning lesions in the setting of struma ovarii simulating highly differentiated follicular carcinoma. *J Nucl Med Technol*. 2015;43(3):231–233. doi: 10.2967/jnmt.114.149294
20. Brogssitter C, Wonsak A, Würll K, Kotzerke J. Peritoneal strumosis. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*. 2004;31(7):1057. doi: 10.1007/s00259-004-1548-3

ОБ АВТОРАХ

* **Нуднов Николай Васильевич**, д-р мед. наук, профессор;
адрес: Россия, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 86;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5994-0468>;
eLibrary SPIN: 3018-2527; e-mail: nudnov@rncrr.ru

Ивашина Светлана Вячеславовна, к.м.н.,

ст. науч. сотр.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9287-2636>;

eLibrary SPIN: 7829-2899; e-mail: s.ivashina@bk.ru

Аксенова Светлана Павловна, к.м.н., науч. сотр.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2552-5754>;

eLibrary SPIN: 4858-4627; e-mail: fabella@mail.ru

AUTHORS' INFO

* **Nikolai V. Nudnov**, MD, Dr. Sci. (Med), Professor;
address: 86 Profsoyuznaya street, 117997 Moscow, Russia;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5994-0468>;
eLibrary SPIN: 3018-2527; e-mail: nudnov@rncrr.ru

Svetlana V. Ivashina, MD, Cand. Sci. (Med),

Senior Research Associate;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9287-2636>;

eLibrary SPIN: 7829-2899; e-mail: s.ivashina@bk.ru

Svetlana P. Aksenova, MD, Cand. Sci. (Med), Research Associate;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2552-5754>;

eLibrary SPIN: 4858-4627; e-mail: fabella@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD289714>

Мальформация Абернети: клинический случай

А.В. Панюкова¹, В.Е. Сеницын¹, Е.А. Мершина¹, Н.А. Ручьёва²

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Медицинский научно-образовательный центр, Москва, Российская Федерация

² Национальный медицинский исследовательский центр трансплантологии и искусственных органов имени академика В.И. Шумакова, Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Врождённые портокавальные шунты — редкие сосудистые аномалии, связанные с частичным или полным отведением портальной крови в системный кровоток. Врождённые внепечёчные портокавальные шунты называются мальформацией Абернети. Ввиду низкой частоты встречаемости и разнообразия клинических проявлений выявление данной патологии представляет диагностическую проблему.

В статье описан клинический случай мальформации Абернети типа Ib у 15-летнего пациента с длительным анамнезом повышенного артериального давления, рецидивирующими носовыми кровотечениями, болью в груди, головокружением, одышкой, низкой толерантностью к физической нагрузке, эпизодами крови в стуле, болью в эпигастральной области, тошнотой и зудом. В результате проведённого комплексного обследования у пациента была диагностирована аномалия развития портальной системы: расширенный конduit воротной вены, впадающий непосредственно в нижнюю полую вену. Выявлены также множественные узлы в паренхиме печени, расширение камер сердца, гипертрофия миокарда и лёгочная гипертензия. Учитывая выраженность симптомов, размеры и тип шунта, междисциплинарным консилиумом рекомендована трансплантация печени.

В статье рассматриваются алгоритмы диагностики и другие возможные варианты лечения аномалий развития портальной системы.

Ключевые слова: клинический случай; сосудистые мальформации; врождённые внепечёчные портосистемные шунты; мальформация Абернети; КТ-ангиография.

Как цитировать

Панюкова А.В., Сеницын В.Е., Мершина Е.А., Ручьёва Н.А. Мальформация Абернети: клинический случай // *Digital Diagnostics*. 2023. Т. 4, № 2. С. 226–237. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD289714>

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD289714>

Abernethy malformation: A case report

Alexandra V. Panyukova¹, Valentin E. Sinitsyn¹, Elena A. Mershina¹, Natalia A. Rucheva²

¹ Lomonosov Moscow State University, Medical Research and Educational Center, Moscow, Russian Federation

² V.I. Shumakov National Medical Research Center of Transplantology and Artificial Organs, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Congenital portosystemic shunts are rare congenital vascular malformations characterized by a partial or complete portal blood diversion into the systemic circulation. Congenital extrahepatic portosystemic shunts, known as Abernethy malformations, pose a diagnostic challenge due to their low incidence and clinical presentations.

A 15-year-old male with a history of chronic epigastric pain and nausea, high arterial blood pressure, recurrent nose bleeds, chest pain, dizziness, dyspnea, low exercise tolerance, hematochezia, and itching was diagnosed with Abernethy malformation type Ib. Imaging studies revealed a dilated portal vein conduit flowing into the inferior vena cava, bypassing the porta hepatis. Multiple liver nodules, heart chamber dilatation, myocardial hypertrophy, and pulmonary hypertension were also discovered. Following multidisciplinary panel meetings, liver transplantation was advised due to the severity of the patient's symptoms and shunt anatomy.

Furthermore, diagnostic algorithms and other treatment options are discussed.

Keywords: Abernethy malformation; computed tomography angiography; congenital extrahepatic portosystemic shunt; vascular malformations.

To cite this article

Panyukova AV, Sinitsyn VE, Mershina EA, Rucheva NA. Abernethy malformation: A case report. *Digital Diagnostics*. 2023;4(2):226–237.

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD289714>

Received: 06.03.2023

Accepted: 03.04.2023

Published: 12.05.2023

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD289714>

Abernethy畸形：临床病例

Alexandra V. Panyukova¹, Valentin E. Sinitsyn¹, Elena A. Mershina¹, Natalia A. Rucheva²

¹ Lomonosov Moscow State University, Medical Research and Educational Center, Moscow, Russian Federation

² V.I. Shumakov National Medical Research Center of Transplantology and Artificial Organs, Moscow, Russian Federation

简评

先天性肝外门腔分流是与部分或全部门静脉血转入全身血液有关的罕见血管异常。先天性肝外门腔分流被称为Abernethy畸形。由于发病率低并临床表现多样，这种病理的识别是一个诊断问题。

本文描述了一个15岁患者的Ib型Abernethy畸形的临床病例，该患者长期有高血压、反复鼻出血、胸痛、头晕、呼吸困难、运动耐力低下、便血、上腹痛、恶心和瘙痒等病史。经过全面检查，患者被诊断为门静脉系统异常：门静脉导管扩张，直接流入下腔静脉。还发现了肝实质中的多个结节、扩张的心腔、心肌肥厚和肺动脉高压。鉴于症状的严重性以及分流的大小和类型，一个多学科科联合会诊建议进行肝移植。

我们在本文中讨论了门静脉系统异常的诊断算法和其他可能的治疗方案。

关键词：临床病例；血管畸形；先天性肝外门腔分流；Abernethy畸形；CT血管造影。

To cite this article

Panyukova AV, Sinitsyn VE, Mershina EA, Rucheva NA. Abernethy畸形：临床病例. *Digital Diagnostics*. 2023;4(2):226-237.

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD289714>

收到：06.03.2023

接受：03.04.2023

发布日期：12.05.2023

АКТУАЛЬНОСТЬ

Врождённые портосистемные шунты (ВПШ) — редкая врождённая аномалия, связанная с частичным или полным отведением портальной крови в системный кровоток. По оценкам, частота ВПШ составляет 1:30 000 новорождённых и 1:50 000 среди пациентов старшего возраста [1]. Классификация ВПШ сложна из-за значительной варибельности анатомии сосудов. ВПШ подразделяются на внутри- и внепечёночные шунты с частичным или полным отсутствием портального кровотока [2]. Врождённые внепечёночные портосистемные шунты (ВВПШ) называют мальформацией Абернети (John Abernethy), который впервые описал патологию в 1793 году [3]. Однако случаев ВВПШ описано крайне мало.

ОПИСАНИЕ КЛИНИЧЕСКОГО СЛУЧАЯ

0 пациенте

Пятнадцатилетний юноша поступил в больницу для обследования по поводу хронической боли в эпигастральной области и тошноты. У больного также наблюдались эпизоды повышенного артериального давления (до 160/90 мм рт. ст.), повторяющиеся носовые кровотечения, боль в груди, головокружение, одышка, низкая переносимость физических нагрузок, гематокезия, продолжительный кожный зуд.

Анамнез болезни: за 12 лет до поступления диагностирована портальная гипертензия (медицинская документация не предоставлена).

Лабораторная и инструментальная диагностика

Функциональные пробы печени показали умеренное повышение активности аланиновой аминотрансферазы (59,8 Ед/л при норме 13–50), повышение уровней аспаратаминотрансферазы (67,1 Ед/л при норме 15–46), гамма-глутамилтрансферазы (91 Ед/л при норме 2–42), щелочной фосфатазы (316 Ед/л при норме 52–171), общего билирубина (39,2 мкмоль/л при норме 3,4–17,1), прямого билирубина (12,5 мкмоль/л при норме 0–5), а также незначительное снижение концентрации альбумина (40,2 г/л при норме 41–55).

Общий анализ крови и коагуляционные исследования были в пределах нормы; азот мочевины крови и сывороточный креатинин также соответствовали референсным значениям.

Трансторакальная эхокардиография выявила дилатацию камер сердца, гипертрофию миокарда (толщина стенок левого желудочка 1,6 см), систолическую лёгочную гипертензию (систолическое давление в лёгочной артерии 40 мм рт. ст.). Наблюдалась эктазия аорты (диаметр на уровне фиброзного кольца 3,4 см, синусов Вальсальвы — 5,1 см, восходящей аорты — 4,0 см). Стеноз выходного тракта левого желудочка и гипокинезия стенки желудочка не обнаружены; функция левого желудочка сохранена.

Результаты ультразвукового исследования (УЗИ) брюшной полости: увеличенная печень с множественными образованиями, размерами 7–8 мм; изменения в структуре паренхимы; признаки фиброза; отсутствие выраженного портального венозного ствола или ветвей в области ворот печени; деформированный, обеднённый сосудистый рисунок печени; стеноз печёночных вен. Отмечались также портальная гипертензия и умеренное увеличение селезёнки.

Для оценки потенциала злокачественности выявленных образований измерен уровень альфа-фетопротеина в сыворотке крови: концентрация соответствовала норме (1,72 МЕ/мл).

С целью подтверждения диагноза и уточнения анатомии сосудов проведены дополнительные визуализационные исследования.

Компьютерная томография (КТ) брюшной полости с контрастным усилением и мультипланарной реконструкцией показала, что селезёночная вена диаметром 12 мм (рис. 1) и верхняя брыжеечная вена слились воедино, образовав конduit воротной вены диаметром до 28 мм (рис. 2, 3), впадающий непосредственно в нижнюю полую вену, минуя ворота печени (рис. 4). Наблюдалась также умеренное увеличение печени и селезёнки и слабое неоднородное контрастное усиление паренхимы печени. По результатам обследования диагностирована мальформация Абернети типа Ib.

КТ-ангиография лёгких не выявила аномальных сосудистых шунтов, однако подтвердила дилатацию лёгочного ствола (диаметр 40 мм) (рис. 5) и камер сердца, а также гипертрофию миокарда (рис. 6).

Лечение и прогноз

В связи с низкой эффективностью консервативного лечения, тяжестью симптомов и анатомией шунта на междисциплинарном консилиуме было рекомендовано проведение трансплантации печени. В настоящее время пациент ожидает хирургического вмешательства.

ОБСУЖДЕНИЕ

Механизмы возникновения

Этиология и развитие врождённых и приобретённых портосистемных шунтов существенно различаются. ВВПШ возникают из-за аномального формирования или инволюции сосудистой системы плода, тогда как приобретённые шунты вторичны по отношению к заболеваниям печени [2]. В литературе представлены две доминирующие теории формирования ВВПШ: врождённые пороки развития и аномалии венозного протока.

Развитие портальной системы — многоэтапный процесс, происходящий между 4-й и 10-й неделями внутриутробного развития. В отличие от полых вен, образующихся вследствие взаимодействия передней и задней кардинальных вен, портальная венозная система формируется

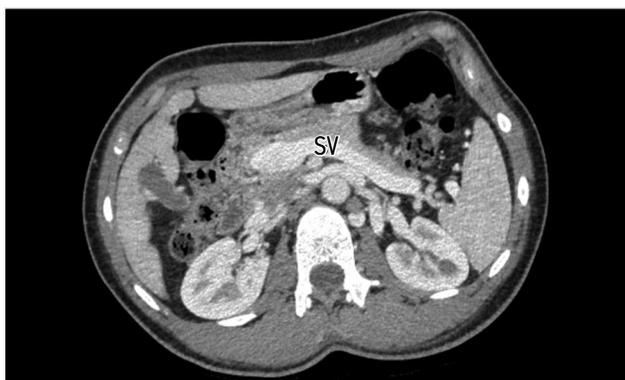


Рис. 1. Компьютерная томография с контрастированием, портальная фаза, аксиальная проекция: расширенная селезёночная вена (SV).



Рис. 2. Компьютерная томография с контрастированием, портальная фаза, фронтальная проекция: селезёночная (SV) и верхняя брыжеечная (SMV) вены сливаются воедино, образуя конduit воротной вены (стрелка).



Рис. 3. Компьютерная томография с контрастированием, портальная фаза, аксиальная проекция: конduit воротной вены (стрелка).



Рис. 4. Компьютерная томография с контрастированием, портальная фаза, фронтальная проекция: конduit воротной вены впадает непосредственно в нижнюю полую вену (стрелка); увеличение размеров печени; неоднородное контрастирование паренхимы печени.



Рис. 5. Компьютерно-томографическая ангиография лёгких, аксиальная проекция: дилатация лёгочного ствола.



Рис. 6. Компьютерно-томографическая ангиография лёгких, аксиальная проекция: гипертрофия миокарда.

из желточных вен, несущих кровь от желточного мешка к венозному синусу [4]. При нарушении развития портальной системы возникают ВВПШ. Этот вариант тесно связан с комбинированными врождёнными патологиями. По данным исследования O. Bernard и соавт. [1], врождённый порок сердца — наиболее часто встречающаяся сопутствующая патология (45 из 265 случаев). В числе других зарегистрированных пороков развития отмечались

аномалии головного мозга, почек, желчных протоков, включая билиарную атрезию, пищеварительной системы, костей.

Другой обсуждаемый механизм возникновения ВВПШ — отсутствие функционирующего венозного протока у плода вследствие анатомических дефектов или окклюзии. У здорового плода кровь по венозному протоку поступает из пупочной вены в нижнюю полую вену, минуя

Таблица 1. Классификация портосистемных аномалий по G. Morgan и R. Superina [8]

Тип I	<p>Печень не перфузируется портальной кровью — полный шунт</p> <p>Ia: верхняя брыжеечная вена и селезёночная вена дренируются отдельно в системный кровоток</p> <p>Ib: верхняя брыжеечная вена и селезёночная вена формируют единый ствол воротной вены, который дренируется в системный кровоток</p>
Тип II	<p>Печень перфузируется портальной кровью — частичный шунт (например, портально-печёночные венозные анастомозы)</p> <p>IIa: врождённый</p> <p>IIb: приобретённый</p>

печень. Функциональное закрытие венозного протока происходит в течение первых минут после рождения ребёнка, а структурное — в течение первых недель жизни у большинства доношенных новорождённых [5]. Пупочная вена и венозный проток анатомически закрываются в первые месяцы жизни и становятся круглой связкой печени и венозной связкой соответственно [4]. Патологии венозного протока могут провоцировать образование аномальных сосудов у плода, которые, в свою очередь, могут превращаться в аномальные шунты, что приводит к гипоплазии портальной венозной системы. В некоторых описанных случаях ВВПШ отмечалось отсутствие венозного протока [6, 7].

Классификация

Широко используемая классификация ВВПШ — это система классификации, предложенная G. Morgan и R. Superina в 1994 году (табл. 1), согласно которой

мальформация Абернети делится на два типа в зависимости от наличия внутripечёночной портальной системы [8]. Тип I определяется как полный портосистемный шунт, тогда как тип II описывается как частичное шунтирование крови в системные вены с некоторой степенью развития портальной системы (рис. 7). В зависимости от типа ВВПШ применяются различные терапевтические подходы [9].

Клинические проявления и осложнения

Описываемая патология отличается многообразием клинических проявлений. Выраженность симптомов зависит от объёма крови, протекающей через шунт, и варьирует от случайных находок у бессимптомных взрослых пациентов [10, 11] до сложных врождённых пороков развития [12], тяжёлой гипоксемии [13], энцефалопатии [14, 15] и злокачественных новообразований печени [16]. У большинства пациентов наблюдаются неспецифические

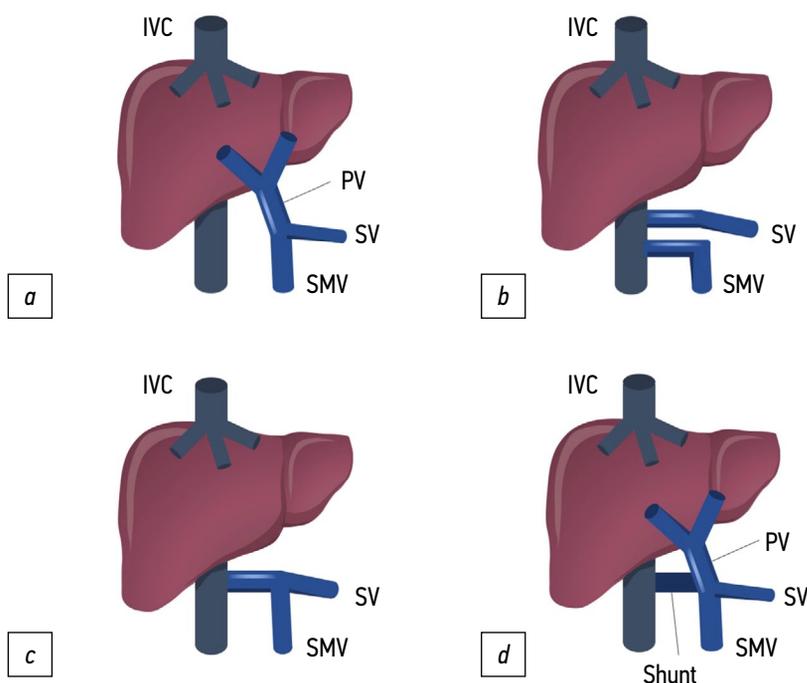


Рис. 7. Нормальная анатомия воротной вены и классификация шунтов: *a* — нормальная анатомия воротной вены; *b* — врождённый внепечёночный портосистемный шунт, тип Ia; *c* — врождённый внепечёночный портосистемный шунт, тип Ib; *d* — врождённый внепечёночный портосистемный шунт, тип II.

Примечание. IVC (inferior vena cava) — нижняя полая вена; PV (portal vein) — воротная вена; SV (splenic vein) — селезёночная вена; SMV (superior mesenteric vein) — верхняя брыжеечная вена; Shunt — шунт.

симптомы, обусловленные острой декомпенсацией печёночной недостаточности или циррозом печени. В исследовании X. Lin и соавт. [17], основанном на анализе 451 статьи и включающем данные 703 пациентов с ВВПШ, сообщается, что большинство пациентов с мальформацией Абернети были детьми или молодыми людьми в возрасте до 18 лет. Тяжёлые врождённые патологии с высокой степенью шунтирования крови чаще диагностируются в более молодом возрасте. У пациентов с частичным шунтированием крови заболевание может протекать бессимптомно вплоть до зрелого возраста.

Первым признаком ВВПШ может быть галактоземия, диагностированная в раннем неонатальном периоде во время рутинного скрининга. Галактоза метаболизируется в печени ферментом галактозо-1-фосфат-уридилтрансфераза до глюкозы, однако у детей с ВВПШ галактоза с током крови минует печень, что приводит к повышению её уровня в системном кровотоке [18, 19]. По данным ряда исследователей, гипергалактоземия выявляется у 70% новорождённых с ВВПШ [1]. Другие возможные проявления в раннем неонатальном периоде — задержка роста, неонатальный холестаза, печёночная энцефалопатия [20].

У пациентов с более лёгкой патологией ВВПШ может оставаться незамеченным до зрелого возраста. Проявления могут быть обусловлены симптомами, связанными с развитием печёночной энцефалопатии, новообразований в печени или лёгочной гипертензии.

У 30% пациентов с ВВПШ наблюдается субклиническая печёночная энцефалопатия [21]. Шунтирование портальной крови вызывает повышение уровня аммония в системном кровотоке. Аммиак, образуемый в желудочно-кишечном тракте, с током крови по шунту минует печень и поступает непосредственно в нижнюю полую вену. Астроциты метаболизируют аммоний до глутамина, который оказывает токсическое воздействие на головной мозг [14]. Однако гипераммониемия не всегда сопровождается энцефалопатией, особенно в молодом возрасте. Клиническая энцефалопатия чаще встречается у более взрослых пациентов, вероятно, вследствие снижения компенсаторных возможностей [15]. Диагностика в таких случаях может быть затруднена из-за низкой специфичности симптомов [14, 22, 23]. При выявлении повышенной концентрации аммиака в сыворотке крови у пациентов без признаков цирроза печени может быть целесообразно проведение дальнейшего обследования для исключения ВВПШ.

Пациенты с ВПШ подвержены к развитию множественных образований печени. Литературные данные о характере гистологических изменений паренхимы печени у пациентов с ВПШ ограничены. С. De Vito и соавт. [24] описали серию случаев с участием 22 пациентов с ВПШ, включая 19 пациентов с ВВПШ, которые были обследованы и наблюдались в их учреждении в течение 15 лет. Согласно полученным результатам, наиболее характерные гистологические находки в периферических

участках паренхимы печени включали наличие портальных тонкостенных каналов, артериально-билиарных диад, увеличенных артериальных профилей в портальных трактах и дольках, а также частое отсутствие перипортально-вакуолизованных гепатоцитов у детей.

Патофизиология развития образований печени у пациентов с ВВПШ остаётся неясной. Один из возможных механизмов — снижение способности печени к регенерации. Низкий портальный кровоток приводит к снижению доставки инсулина и глюкагона к гепатоцитам, что увеличивает риск их повреждения и развития новообразований [25]. Кроме того, увеличение печёночного артериального кровотока может быть связано с дедифференцировкой паренхимальных клеток [16].

Частое проявление ВВПШ — узловые образования печени, выявляемые у пациентов с различными типами мальформации Абернети. В большинстве случаев данные новообразования имеют доброкачественную природу и являются очагами узловой гиперплазии, аденомами печени или узлами регенерации. Доброкачественные новообразования печени чаще протекают бессимптомно. В описываемом клиническом случае узловые образования также были случайной находкой во время УЗИ брюшной полости.

Однако не все выявляемые образования печени у пациентов с ВВПШ являются доброкачественными. Мальформация Абернети I типа связана с развитием гепатобластом и гепатоцеллюлярных карцином [26, 27]. Гепатобластомы — редкие низкодифференцированные опухоли печени, встречающиеся у детей с ВВПШ. Гепатобластома имеет крайне неблагоприятный прогноз, большинство описанных случаев у пациентов с ВВПШ были летальными [25, 26]. Гепатоцеллюлярные карциномы чаще наблюдаются во взрослом возрасте, но бывают исключения. Так, M. Benedict и соавт. [28] опубликовали случай 12-месячного мальчика с ВВПШ с гистологически и иммуногистохимически подтверждённой гепатоцеллюлярной карциномой. Диагностика злокачественных опухолей может быть затруднена, поскольку некоторые опухоли имеют неоднозначные визуальные характеристики и могут быть приняты за доброкачественные образования [11]. В таких случаях для постановки диагноза требуется биопсия. Один из вариантов лечения — трансплантация печени [29].

У некоторых пациентов с ВВПШ наблюдаются симптомы лёгочной гипертензии: затруднённое дыхание и одышка [30, 31]. Тяжёлая лёгочная гипертензия может привести к кардиогенному обмороку вследствие снижения преднагрузки и низкой церебральной перфузии [17]. В описываемом клиническом случае также была диагностирована лёгочная гипертензия.

У пациентов с заболеваниями печени, сопровождающимися портальной гипертензией, может развиваться гепатопульмональный синдром. Вазоактивные медиаторы из кишечника, минуя печёночное кровообращение через портосистемный шунт, поступают непосредственно в лёгочное сосудистое русло, вызывая дисбаланс между



Рис. 8. Алгоритм ведения пациентов с врождённым внепечёночным портосистемным шунтом по A. Vaiges и соавт. [32].

вазодилатационными и вазоконстрикционными веществами, индуцируя лёгочную гипертензию [9]. Терапия данного состояния — коррекция сосудистых аномалий печени.

Диагностика и лечение

В настоящее время нет опубликованных клинических рекомендаций по диагностике и лечению ВВПШ. A. Vaiges и соавт. [32] на основании результатов многоцентрового международного исследования, включавшего 66 пациентов, предложили свой алгоритм ведения пациентов с ВВПШ (рис. 8).

В описываемом клиническом случае подозрение на мальформацию Абернети возникло при проведении УЗИ брюшной полости. Как правило, ультразвуковые признаки ВВПШ включают отсутствие или гипоплазию воротной вены, очаговые образования в паренхиме печени, недостаточность внутripечёночных портальных сосудов и сигналов потока, гипертрофию печёночной артерии [33]. Аномалии, выявленные в ходе УЗИ, должны быть дополнительно подтверждены с помощью других методов визуализации, таких как КТ или магнитно-резонансная ангиография (МР-ангиография). КТ с контрастным усилением даёт важную информацию о размере, расположении и типе шунта, что помогает в выборе наиболее оптимального подхода к лечению индивидуально для каждого пациента. Кроме того, КТ позволяет визуализировать и оценивать сопутствующие аномалии, включая образования в печени. МР-ангиография — надёжный неинвазивный метод визуализации анатомии печёночных сосудов, который в отличие от КТ не сопряжён

с рентгеновским излучением и имеет более высокий тканевой контраст. Кроме того, применение диффузионно-взвешенных изображений и гепатотропных контрастных препаратов может дать дополнительную ценную информацию для оценки узловых образований печени и последующего принятия решений о тактике ведения пациента.

Терапевтический подход зависит от типа и размеров шунта, тяжести симптомов, сопутствующих аномалий и осложнений. Бессимптомные пациенты могут находиться под медицинским наблюдением. Так, учитывая риск развития осложнений, L. Kwarisz и соавт. [27] рекомендуют пациентам с ВВПШ проходить плановые медицинские обследования, регулярные анализы крови, включая печёночные пробы, а также ежегодные визуализирующие исследования печени.

Опыт лечения пациентов с мальформацией Абернети по-прежнему невелик. Исходя из описанных случаев, современные варианты хирургического лечения включают интервенционное или хирургическое закрытие шунта и трансплантацию печени. Варианты долгосрочного лечения при I типе ограничиваются пересадкой печени с поддерживающей терапией в период ожидания операции. У пациентов с ВВПШ II типа имеется больший выбор вариантов терапии в зависимости от развившихся осложнений и сопутствующих аномалий. Один из них — лигирование или закрытие портосистемного шунта с помощью интервенционной ангиографии [34]. Однако стоит учитывать, что интервенционное закрытие может вызвать рецидивирующую гипераммониемию [35].

Может оказаться полезным проведение диагностической окклюзии шунта баллонным катетером для оценки

внутрипечёночной портальной системы у пациентов с обоими типами ВВПШ [35]. Этот тест позволяет визуализировать мелкие ветви воротной вены, которые невозможно увидеть на УЗИ. Н. Kanazawa и соавт. [36] предложили новую классификацию внутрипечёночной портальной системы (лёгкая, умеренная и тяжёлая), исходя из результатов теста на окклюзию шунта. Классификация внутрипечёночной портальной системы коррелирует с портальным венозным давлением при окклюзии шунта, результатами гистопатологических исследований, послеоперационным портальным венозным кровотоком и регенерацией печени и полезна для принятия решения о проведении одно- или двухэтапного закрытия шунта или трансплантации печени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мальформация Абернети — редкая патология, связанная с тяжёлыми осложнениями и неблагоприятными исходами. Постановка диагноза ВВПШ представляет собой сложную диагностическую задачу из-за низкой распространённости, неспецифичности симптомов, вовлечения различных систем органов и вариабельности клинических проявлений. Методы медицинской визуализации играют важную роль в диагностике данной патологии и планировании лечения. Раннее выявление и индивидуальный подход к лечению пациента имеют решающее значение для предотвращения развития осложнений. Кроме того, требуются длительное медицинское наблюдение за пациентами и регулярные обследования для своевременного выявления злокачественных новообразований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bernard O., Franchi-Abella S., Branchereau S., et al. Congenital portosystemic shunts in children: Recognition, evaluation, and management // *Seminars Liver Dis.* 2012. Vol. 32, N 4. P. 273–287. doi: 10.1055/s-0032-1329896
2. Papamichail M., Pizani M., Heaton N. Congenital portosystemic venous shunt // *Eur J Pediatrics.* 2018. Vol. 177, N 3. P. 285–294. doi: 10.1007/s00431-017-3058-x
3. Abernethy J. Account of two instances of uncommon formation in the viscera of the human body: From the philosophical transactions of the royal society of London // *Med Facts Observations.* 1797. N 7. P. 100–108.
4. Guérin F., Blanc T., Gauthier F., et al. Congenital portosystemic vascular malformations // *Seminars Pediatric Sur.* 2012. Vol. 21, N 3. P. 233–244. doi: 10.1053/j.sempedsurg.2012.05.006
5. Born M. The ductus venosus // *RoFo Fortschritte Gebiet Röntgenstrahlen Bildgebenden Verfahren.* 2021. Vol. 193, N 5. P. 521–526. doi: 10.1055/a-1275-0984
6. Baller S.E., Reinehr M., Haslinger C., et al. Case report of neonatal ductus venosus atresia // *J Neonatal-Perinatal Med.* 2021. Vol. 14, N 2. P. 307–312. doi: 10.3233/NPM-190398
7. Franchi-Abella S., Branchereau S., Lambert V., et al. Complications of congenital portosystemic shunts in children: Therapeutic

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении поисково-аналитической 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 поисково-аналитической работы и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Информированное согласие на публикацию. Законные представители пациента добровольно подписали информированное согласие на публикацию персональной медицинской информации в обезличенной форме в журнале *Digital Diagnostics*.

ADDITIONAL INFORMATION

Funding source. This study 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.

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.

options and outcomes // *J Pediatric Gastroenterol Nutrition.* 2010. Vol. 51, N 3. P. 322–330. doi: 10.1097/MPG.0b013e3181d9cb92

8. Morgan G., Superina R. Congenital absence of the portal vein: Two cases and a proposed classification system for portosystemic vascular anomalies // *J Pediatric Sur.* 1994. Vol. 29, N 9. P. 1239–1241. doi: 10.1016/0022-3468(94)90812-5

9. Tang H., Song P., Wang Z., et al. A basic understanding of congenital extrahepatic portosystemic shunt: Incidence, mechanism, complications, diagnosis, and treatment // *Intractable Rare Dis Res.* 2020. Vol. 9, N 2. P. 64–70. doi: 10.5582/irdr.2020.03005

10. Păcurar D., Dijmărescu I., Dijmărescu A.D., et al. A case report on an incidental discovery of congenital portosystemic shunt // *Medicine.* 2019. Vol. 98, N 31. P. e16679. doi: 10.1097/MD.00000000000016679

11. Shah A., Aziz A., Awwad A., et al. Incidental radiological diagnosis of asymptomatic Abernethy malformations: Two case reports // *BJR|Case Reports.* 2017. Vol. 3, N 1. P. 20150496. doi: 10.1259/bjrcr.20220059

12. Yangín-Ergon E., Ermis N., Colak R., et al. Abernethy malformation type 2 and biliary atresia coexistence: A rare cause of infantile liver transplant // *Euroasian J Hepatogastroenterol.* 2018. Vol. 8, N 2. P. 163–166. doi: 10.5005/jp-journals-10018-1283

13. Sahu M.K., Bisoi A.K., Chander N.C., et al. Abernethy syndrome, a rare cause of hypoxemia: A case report // *Ann Pediatric Cardiol*. 2015. Vol. 8, N 1. P. 64–66. doi: 10.3389/fcvm.2021.784739
14. Lux D., Naito A., Hari Krishnan S. Congenital extrahepatic portosystemic shunt with progressive myelopathy and encephalopathy // *Practical Neurology*. 2019. Vol. 19, N 4. P. 368–371. doi: 10.1136/practneurol-2018-002111
15. Merola E., Cao M., La Starza S., et al. Portosystemic encephalopathy in an 86-year-old patient: A clinical challenge // *Acta Gastro-Enterologica Belgica*. 2016. Vol. 79, N 1. P. 58–59.
16. Sharma R., Suddle A., Quaglia A., et al. Congenital extrahepatic portosystemic shunt complicated by the development of hepatocellular carcinoma // *Hepatobiliary Pancreatic Dis Int*. 2015. Vol. 14, N 5. P. 552–557. doi: 10.1016/S1499-3872(15)60418-0
17. Lin X., Rao J., Xiang Y., et al. Case report: A rare syncope case caused by abernethy ii and a review of the literature // *Front Cardiovascul Med*. 2022. Vol. 8. P. 2050. doi: 10.3389/fcvm.2021.784739
18. Hasegawa T., Sato T., Ishii T., et al. Oral sodium phenylbutyrate for hyperammonemia associated with congenital portosystemic shunt: A case report // *J Pediatric Endocrinology Metabolism*. 2021. Vol. 34, N 3. P. 407–410. doi: 10.1515/jpem-2020-0603
19. Peček J., Fister P., Homan M. Abernethy syndrome in Slovenian children: Five case reports and review of literature // *World J Gastroenterol*. 2020. Vol. 26, N 37. P. 5731–5744. doi: 10.3748/wjg.v26.i37.5731
20. Pathak A., Agarwal N., Mandliya J., et al. Abernethy malformation: A case report // *BMC Pediatrics*. 2012. Vol. 12, N 1. P. 1. doi: 10.1186/1471-2431-12-57
21. Duarte-Mesquita R., Sousa M., Vilaverde F., Cardoso R. Abernethy malformation: Beware in cases of unexplained hepatic encephalopathy in adults // *BJR| Case Reports*. 2017. Vol. 4, N 2. P. 20170054. doi: 10.1259/bjrcr.20170054
22. Allegritti M., Enrico B., Basile E., et al. Non-cirrhotic extra-hepatic porto-systemic shunt causing adult-onset encephalopathy treated with endovascular closure // *Digestive Diseases and Sciences*. 2020. Vol. 65, N 4. P. 946–951. doi: 10.1007/s10620-019-06024-4
23. Alvi A.A., Pichardo J., Gupta S., et al. An interesting case of congenital intrahepatic porto-hepatic shunt as a cause of unexplained encephalopathy // *Cureus*. 2020. Vol. 12, N 4. P. e7639. doi: 10.14309/01.ajg.0000598392.71372.f2
24. De Vito C., Tyraskis A., Davenport M., et al. Histopathology of livers in patients with congenital portosystemic shunts (Abernethy malformation): A case series of 22 patients // *Virchows Archiv*. 2019. Vol. 474, N 1. P. 47–57. doi: 10.1007/s00428-018-2464-4
25. Lautz T.B., Shah S.A., Superina R.A. Hepatoblastoma in children with congenital portosystemic shunts // *J Pediatric Gastroenterology Nutrition*. 2016. Vol. 62, N 4. P. 542–545. doi: 10.1097/MPG.0000000000001012
26. Correa C., Luengas J.P., Howard S.C., Veintemilla G. Hepatoblastoma and abernethy malformation type I: Case report // *J Pediatric Hematology/Oncology*. 2017. Vol. 39, N 2. P. e79–e81. doi: 10.1097/MPH.0000000000000650
27. Kwapisz L., Wells M.M., Judaibi B. Al Abernethy malformation: Congenital absence of the portal vein // *Can J Gastroenterol Hepatol*. 2014. Vol. 28, N 11. P. 587–588. doi: 10.1155/2014/675812
28. Benedict M., Rodriguez-Davalos M., Emre S., et al. Congenital extrahepatic portosystemic shunt (abernethy malformation type Ib) with associated hepatocellular carcinoma: Case report and literature review // *Pediatric Developmental Pathology*. 2017. Vol. 20, N 4. P. 354–362. doi: 10.1177/1093526616686458
29. Özden İ., Yavru A., Güllüoğlu M., et al. Transplantation for large liver tumors in the setting of abernethy malformation // *Experimental Clin Transplantation*. 2017. Vol. 15, Suppl. 2. P. 82–85. doi: 10.6002/ect.TOND16.L23
30. Lin K. Y., Chen H., Yu L. Pulmonary arterial hypertension caused by congenital extrahepatic portocaval shunt: A case report // *BMC Cardiovascular Disorders*. 2019. Vol. 19, N 1. P. 1–5. doi: 10.1186/s12872-019-1124-1
31. Osorio M.J., Bonow A., Bond G.J., et al. Abernethy malformation complicated by hepatopulmonary syndrome and a liver mass successfully treated by liver transplantation // *Pediatric Transplantation*. 2011. Vol. 15, N 7. P. 149–151. doi: 10.1111/j.1399-3046.2010.01337.x
32. Baiges A., Turon F., Simón-Talero M., et al. Congenital extrahepatic portosystemic shunts (Abernethy malformation): An international observational study // *Hepatology*. 2020. Vol. 71, N 2. P. 658–669. doi: 10.1002/hep.30817
33. Ponziani F.R., Faccia M., Zocco M.A., et al. Congenital extrahepatic portosystemic shunt: Description of four cases and review of the literature // *J Ultrasound*. 2019. N 22. P. 349–358. doi: 10.1007/s40477-018-0329-y
34. Sheth R., Sivakumar K. The Abernethy malformation with inferior caval vein hypoplasia: A tailored technique for transcatheter closure and an insight into embryological perspective // *Cardiology Young*. 2018. Vol. 28, N 9. P. 1169–1171. doi: 10.1017/S1047951118000884
35. Li H., Ma Z., Xie Y., Tian F. Recurrent hyperammonemia after abernethy malformation Type 2 closure: A case report // *Ann Hepatol*. 2017. Vol. 16, N 3. P. 460–464. doi: 10.5604/01.3001.0009.8603
36. Kanazawa H., Nosaka S., Miyazaki O., et al. The classification based on intrahepatic portal system for congenital portosystemic shunts // *J Pediatric Sur*. 2015. Vol. 50, N 4. P. 688–695. doi: 10.1016/j.jpedsurg.2015.01.009

REFERENCES

1. Bernard O, Franchi-Abella S, Branchereau S, et al. Congenital portosystemic shunts in children: Recognition, evaluation, and management. *Seminars Liver Dis*. 2012;32(4):273–287. doi: 10.1055/s-0032-1329896
2. Papamichail M, Pizani M, Heaton N. Congenital portosystemic venous shunt. *Eur J Pediatrics*. 2018;177(3):285–294. doi: 10.1007/s00431-017-3058-x
3. Abernethy J. Account of two instances of uncommon formation in the viscera of the human body: From the philosophical transactions of the royal society of London. *Med Facts Observations*. 1797;(7):100–108.
4. Guérin F, Blanc T, Gauthier F, et al. Congenital portosystemic vascular malformations. *Seminars Pediatric Sur*. 2012;21(3):233–244. doi: 10.1053/j.sempedsurg.2012.05.006

5. Born M. The ductus venosus. *RoFo Fortschritte Gebiet Rontgenstrahlen Bildgebenden Verfahren*. 2021;193(5):521–526. doi: 10.1055/a-1275-0984
6. Baller SE, Reinehr M, Haslinger C, et al. Case report of neonatal ductus venosus atresia. *J Neonatal-Perinatal Med*. 2021;14(2):307–312. doi: 10.3233/NPM-190398
7. Franchi-Abella S, Branchereau S, Lambert V, et al. Complications of congenital portosystemic shunts in children: Therapeutic options and outcomes. *J Pediatric Gastroenterol Nutrition*. 2010;51(3):322–330. doi: 10.1097/MPG.0b013e3181d9cb92
8. Morgan G, Superina R. Congenital absence of the portal vein: Two cases and a proposed classification system for portosystemic vascular anomalies. *J Pediatric Sur*. 1994;29(9):1239–1241. doi: 10.1016/0022-3468(94)90812-5
9. Tang H, Song P, Wang Z, et al. A basic understanding of congenital extrahepatic portosystemic shunt: Incidence, mechanism, complications, diagnosis, and treatment. *Intractable Rare Dis Res*. 2020;9(2):64–70. doi: 10.5582/irdr.2020.03005
10. Păcurar D, Dijmărescu I, Dijmărescu AD, et al. A case report on an incidental discovery of congenital portosystemic shunt. *Medicine*. 2019;98(31):e16679. doi: 10.1097/MD.0000000000016679
11. Shah A, Aziz A, Awwad A, et al. Incidental radiological diagnosis of asymptomatic Abernethy malformations: Two case reports. *BJR|Case Reports*. 2017;3(1):20150496. doi: 10.1259/bjrcr.20220059
12. Yangín-Ergon E, Ermis N, Colak R, et al. Abernethy malformation type 2 and biliary atresia coexistence: A rare cause of infantile liver transplant. *Euroasian J Hepatogastroenterol*. 2018;8(2):163–166. doi: 10.5005/jp-journals-10018-1283
13. Sahu MK, Bisoi AK, Chander NC, et al. Abernethy syndrome, a rare cause of hypoxemia: A case report. *Ann Pediatric Cardiol*. 2015;8(1):64–66. doi: 10.3389/fcvm.2021.784739
14. Lux D, Naito A, Harikrishnan S. Congenital extrahepatic portosystemic shunt with progressive myelopathy and encephalopathy. *Practical Neurol*. 2019;19(4):368–371. doi: 10.1136/practneurol-2018-002111
15. Merola E, Cao M, La Starza S, et al. Portosystemic encephalopathy in an 86-year-old patient: A clinical challenge. *Acta Gastro-Enterologica Belgica*. 2016;79(1):58–59.
16. Sharma R, Suddle A, Quaglia A, et al. Congenital extrahepatic portosystemic shunt complicated by the development of hepatocellular carcinoma. *Hepatobiliary Pancreatic Dis Int*. 2015;14(5):552–557. doi: 10.1016/S1499-3872(15)60418-0
17. Lin X, Rao J, Xiang Y, et al. Case report: A rare syncope case caused by abernethy II and a review of the literature. *Frontiers Cardiovascular Med*. 2022;8:2050. doi: 10.3389/fcvm.2021.784739
18. Hasegawa T, Sato T, Ishii T, et al. Oral sodium phenylbutyrate for hyperammonemia associated with congenital portosystemic shunt: A case report. *J Pediatric Endocrinol Metabolism*. 2021;34(3):407–410. doi: 10.1515/jpem-2020-0603
19. Peček J, Fister P, Homan M. Abernethy syndrome in Slovenian children: Five case reports and review of literature. *World J Gastroenterol*. 2020;26(37):5731–5744. doi: 10.3748/wjg.v26.i37.5731
20. Pathak A, Agarwal N, Mandliya J, et al. Abernethy malformation: a case report. *BMC Pediatrics*. 2012;12(1):1. doi: 10.1186/1471-2431-12-57
21. Duarte-Mesquita R, Sousa M, Vilaverde F, Cardoso R. Abernethy malformation : beware in cases of unexplained hepatic encephalopathy in adults. *BJR| Case Reports*. 2017;4(1):20170054. doi: 10.1259/bjrcr.20170054
22. Allegritti M, Enrico B, Basile E, et al. Non-cirrhotic extra-hepatic porto-systemic shunt causing adult-onset encephalopathy treated with endovascular closure. *Digestive Dis Sci*. 2020;65(4):946–951. doi: 10.1007/s10620-019-06024-4
23. Alvi AA, Pichardo J, Gupta S, et al. An interesting case of congenital intrahepatic porto-hepatic shunt as a cause of unexplained encephalopathy. *Cureus*. 2020;12(4):e7639. doi: 10.14309/01.ajg.0000598392.71372.f2
24. De Vito C, Tyraskis A, Davenport M, et al. Histopathology of livers in patients with congenital portosystemic shunts (Abernethy malformation): A case series of 22 patients. *Virchows Archiv*. 2019;474(1):47–57. doi: 10.1007/s00428-018-2464-4
25. Lautz TB, Shah SA, Superina RA. Hepatoblastoma in children with congenital portosystemic shunts. *J Pediatric Gastroenterology Nutrition*. 2016;62(4):542–545. doi: 10.1097/MPG.0000000000001012
26. Correa C, Luengas JP, Howard SC, Veintemilla G. Hepatoblastoma and abernethy malformation type I: Case report. *J Pediatric Hematology/Oncology*. 2017;39(2):e79–e81. doi: 10.1097/MPH.0000000000000650
27. Kwapisz L, Wells MM, Judaibi BA. Abernethy malformation: Congenital absence of the portal vein. *Can J Gastroenterol Hepatol*. 2014;28(11):587–588. doi: 10.1155/2014/675812
28. Benedict M, Rodriguez-Davalos M, Emre S, et al. Congenital extrahepatic portosystemic shunt (abernethy malformation type Ib) with associated hepatocellular carcinoma: Case report and literature review. *Pediatric Developmental Pathology*. 2017;20(4):354–362. doi: 10.1177/1093526616686458
29. Özden İ, Yavru A, Güllüoğlu M, et al. Transplantation for large liver tumors in the setting of abernethy malformation. *Exp Clin Transplantation*. 2017;15(Suppl 2):82–85. doi: 10.6002/ect.TOND16.L23
30. Lin KY, Chen H, Yu L. Pulmonary arterial hypertension caused by congenital extrahepatic portocaval shunt: A case report. *BMC Cardiovascular Disorders*. 2019;19(1):1–5. doi: 10.1186/s12872-019-1124-1
31. Osorio MJ, Bonow A, Bond GJ, et al. Abernethy malformation complicated by hepatopulmonary syndrome and a liver mass successfully treated by liver transplantation. *Pediatric Transplantation*. 2011;15(7):149–151. doi: 10.1111/j.1399-3046.2010.01337.x
32. Baiges A, Turon F, Simón-Talero M, et al. Congenital extrahepatic portosystemic shunts (Abernethy malformation): An international observational study. *Hepatology*. 2020;71(2):658–669. doi: 10.1002/hep.30817
33. Ponziani FR, Faccia M, Zocco MA, et al. Congenital extrahepatic portosystemic shunt: description of four cases and review of the literature. *J Ultrasound*. 2019;22:349–358. doi: 10.1007/s40477-018-0329-y
34. Sheth R, Sivakumar K. The Abernethy malformation with inferior caval vein hypoplasia: A tailored technique for transcatheter closure and an insight into embryological perspective. *Cardiology Young*. 2018;28(9):1169–1171. doi: 10.1017/S1047951118000884
35. Li H, Ma Z, Xie Y, Tian F. Recurrent hyperammonemia after abernethy malformation type 2 closure: A case report. *Ann Hepatol*. 2017;16(3):460–464. doi: 10.5604/01.3001.0009.8603
36. Kanazawa H, Nosaka S, Miyazaki O, et al. The classification based on intrahepatic portal system for congenital portosystemic shunts. *J Pediatric Sur*. 2015;50(4):688–695. doi: 10.1016/j.jpedsurg.2015.01.009

ОБ АВТОРАХ

*** Панюкова Александра Вадимовна;**

адрес: Россия, 119192, Москва, Ломоносовский пр-т, д. 27, кор. 10;
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5367-280X>;
e-mail: panyukovaalexandra@gmail.com

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5649-2193>;
eLibrary SPIN: 8449-6590; e-mail: vsini@mail.ru

Мершина Елена Александровна, канд. мед. наук, доцент;

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1266-4926>;
eLibrary SPIN: 6897-9641; e-mail: elena_mershina@mail.ru

Ручьёва Наталья Александровна, канд. мед. наук;

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8063-4462>;
e-mail: rna1969@yandex.ru

AUTHORS' INFO

*** Alexandra V. Panyukova, MD;**

address: 27/10 Lomonosovsky prospekt, 119192 Moscow, Russia;
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5367-280X>;
e-mail: panyukovaalexandra@gmail.com

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5649-2193>;
eLibrary SPIN: 8449-6590; e-mail: vsini@mail.ru

Elena A. Mershina, MD, Cand. Sci. (Med.), Assistant Professor;

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1266-4926>;
eLibrary SPIN: 6897-9641; e-mail: elena_mershina@mail.ru

Natalia A. Rucheva, MD, Cand. Sci. (Med.);

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8063-4462>;
e-mail: rna1969@yandex.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD121368>

Проверка гипотез исследования с использованием языка R

И.А. Блохин¹, М.Р. Коденко^{1,2}, Ю.Ф. Шумская^{1,3}, А.П. Гончар¹, Р.В. Решетников¹¹ Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий, Москва, Российская Федерация² Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация³ Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова (Сеченовский Университет), Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Для современных учёных становятся всё более важными компетенции в области статистической обработки данных. Очевидными преимуществами открытого программного обеспечения (open-source software) для статистического анализа являются доступность и многофункциональность. Наиболее широкими возможностями среди бесплатных решений обладают язык программирования и соответствующее программное обеспечение R, доступное в виде минимального консольного интерфейса или полноценной среды разработки RStudio/Posit.

Предлагаем вашему вниманию практическое руководство по сравнению двух групп с помощью инструментов языка R на примере сопоставления эффективной дозы, полученной при проведении стандартной компьютерной и низкодозной компьютерной томографии при COVID-19, в котором кратко обобщены теоретические подходы к обработке медицинских данных, а также рекомендации по корректной формулировке задач исследования и выбора оптимальных методов статистического анализа.

Основная задача практического руководства — познакомить читателя с интерфейсом Posit и базовым функционалом языка R на практическом примере решения реальной медицинской задачи. Представленный материал может быть полезен на начальном этапе освоения статистического анализа с помощью инструментов языка R.

Ключевые слова: R; RStudio; Posit; статистический анализ; медицинские данные; практическое руководство.

Как цитировать

Блохин И.А., Коденко М.Р., Шумская Ю.Ф., Гончар А.П., Решетников Р.В. Проверка гипотез исследования с использованием языка R // *Digital Diagnostics*. 2023. Т. 4, № 2. С. 238–247. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD121368>

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD121368>

Hypothesis testing using R

Ivan A. Blokhin¹, Maria R. Kodenko^{1,2}, Yuliya F. Shumskaya^{1,3},
Anna P. Gonchar¹, Roman V. Reshetnikov¹

¹ Moscow Center for Diagnostics and Telemedicine, Moscow, Russian Federation

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

³ The First Sechenov Moscow State Medical University, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Competencies in statistical data processing are becoming increasingly important for modern scientists. The apparent advantages of open-source software for statistical analysis are its accessibility and adaptability. The programming language and the corresponding software R, available as a minimalistic console interface or a complete development environment RStudio/Posit, have the widest possibilities among free solutions.

We present a practical guide for comparing two groups using the software R. This study compares the effective doses of standard computed tomography with low-dose computed tomography for COVID-19 patients. The practical guide summarizes theoretical approaches to medical data processing and recommendations for correctly formulating research tasks and selecting optimal statistical analysis methods.

The main goal of the practical guide is to introduce the reader to the Posit interface and the basic functionality of the R language by using a practical example of treating a real medical problem. The presented material can be useful as an introduction to statistical analysis using the programming language R.

Keywords: medical data, Posit, R, RStudio, statistical analysis, tutorial

To cite this article

Blokhin IA, Kodenko MR, Shumskaya YuF, Gonchar AP, Reshetnikov RV. Hypothesis testing using R. *Digital Diagnostics*. 2023;4(2):238–247.

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD121368>

Received: 11.01.2023

Accepted: 18.01.2023

Published: 10.04.2023

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD121368>

使用R语言进行研究假设检验

Ivan A. Blokhin¹, Maria R. Kodenko^{1,2}, Yuliya F. Shumskaya^{1,3},
Anna P. Gonchar¹, Roman V. Reshetnikov¹

¹ Moscow Center for Diagnostics and Telemedicine, Moscow, Russian Federation

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

³ The First Sechenov Moscow State Medical University, Moscow, Russian Federation

简评

对于现代科学家来说，统计数据处理的能力越来越重要。用于统计分析的开源软件（open-source software）的明显优势是可用性和多功能性。在免费的解决方案中，R语言和相关软件大有可为，可作为一个最简控制台界面或作为一个完全合格的开发环境RStudio/Posit。

我们提供一份使用R语言工具比较两组数据的实用指南，以COVID-19的标准电子计算机断层扫描和低剂量电脑断层扫描的有效剂量比较为例。本指南简略地总结了医学数据处理的理论方法，以及正确制定研究目标和选择最佳统计分析方法的建议。

本实用指南的主要目的是通过一个解决真实医学问题的实际例子向读者介绍Posit界面和R语言的基本功能。所介绍的材料在借助R语言工具掌握统计分析的初始阶段可以有益处。

关键词：R; RStudio; Posit; 统计分析; 医学数据; 实用手册。

To cite this article

Blokhin IA, Kodenko MR, Shumskaya YuF, Gonchar AP, Reshetnikov RV. 使用R语言进行研究假设检验. *Digital Diagnostics*. 2023;4(2):238–247.

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD121368>

收到: 11.01.2023

接受: 18.01.2023

发布日期: 10.04.2023

ВВЕДЕНИЕ

Для современных учёных становятся всё более важными компетенции в области статистической обработки данных. В 1983 году для понимания 2/3 из 760 научных публикаций престижного *New England Journal of Medicine* читателю было достаточно владеть базовыми понятиями описательной статистики (процент, среднее значение и стандартное отклонение) и одним методом статистической проверки гипотез (t -критерий Стьюдента) [1]. Со временем научное сообщество столкнулось с ограниченностью такого подхода к анализу данных. В 2014 году *Journal of American Medical Association* анонсировал специальную серию выпусков, направленную на разбор методов статистического анализа для врачей-клиницистов¹. Сегодня в открытом доступе можно найти обзорные работы не только по базовым аспектам анализа данных [2], но и выбору подходящего метода их обработки [3]. Более того, в 2019 году опубликован подробный чек-лист по использованию статистических методов в биомедицинских исследованиях (*Statistical Analysis Methods in Biomedical Research*) [4]. Однако практическое применение методов анализа данных оставалось бы по-прежнему нетривиальной задачей, если бы не активная разработка программ для его автоматизации.

На фоне большого числа платных программ статистического анализа и наличия коммерческих предложений обработки данных «под ключ» очевидными преимуществами открытого программного обеспечения (*open-source software*) являются доступность и многофункциональность [5]. Наиболее широкими возможностями среди бесплатных решений обладает язык программирования и соответствующее программное обеспечение R [6], доступное в виде минималистичного консольного интерфейса [7] или полноценной среды разработки RStudio/Posit [8].

Цель настоящего материала — познакомить читателя с базовыми операциями в R на примере задачи из реальной практики: сравнения эффективной дозы, полученной пациентами при проведении стандартной компьютерной томографии (КТ) и низкодозной компьютерной томографии (НДКТ) при COVID-19. Актуальность задачи основана на необходимости мониторинга лучевой нагрузки [9], в том числе в связи с нарастанием количества выполняемых лучевых исследований [10] и вследствие этого важности разработки [11] и клинической апробации [12, 13] протоколов НДКТ.

При проведении статистического анализа необходимо придерживаться основополагающих этапов.

Постановка задачи и формулировка нулевой гипотезы анализа

Нулевая гипотеза — отправная точка статистического анализа. Для задач сравнения двух групп нулевая гипотеза (H_0) формулируется следующим образом: «Статистически значимые различия отсутствуют». В настоящем примере проводилось сравнение эффективной дозы облучения пациентов для двух типов КТ-исследования (полнодозной и низкодозной) при COVID-19. Другими словами, формулировка H_0 для данной задачи: «Лучевая нагрузка при КТ и НДКТ сопоставима».

Необходимо также помнить про «альтернативную гипотезу» (H_1) — это гипотеза-антагонист H_0 , они должны быть взаимоисключающими. В данном примере альтернативная гипотеза будет звучать так: «Эффективная доза облучения пациентов с COVID-19 при КТ и НДКТ статистически значимо отличается».

Результатом проверки нулевой гипотезы в статистике является так называемое p -value, т.е. вероятность ошибочно отвергнуть H_0 . Это значение можно интерпретировать следующим образом: «Если мы многократно повторим эксперимент и отвергнем нулевую гипотезу, то ошибемся в p -value из 100% случаев». Например, для p -value 0,03 отвергаем H_0 в пользу H_1 и ошибаемся в 3% случаев. Много это или мало, позволяет решить заранее выбранное граничное значение. Благодаря Роналду Фишеру, в большинстве случаев граничное значение p -value берут равным 0,05 [14]. Возвращаясь к примеру и опираясь на границу 0,05, для p -value 0,03 мы можем уверенно заключить, что сравниваемые выборки разные.

Анализ исходных данных

Выбор метода статистического анализа исходных данных зависит от их типа и характера распределения. Выделяют количественные и качественные данные². Количественные данные характеризуют величину явления или число объектов: например, лучевую нагрузку в милливертах при проведении КТ-исследования органов грудной клетки. Качественные, или категориальные, данные описывают отношение исследуемого явления к определённой группе: например, пол пациента или категория по шкале «КТ0–4».

При анализе данных в дополнение к основной гипотезе исследования всегда необходимо проверять ещё одну H_0 : «Данные распределены нормально». Нормальное распределение — одно из самых важных в области статистики, поскольку часто встречается в возникающих естественным путём явлениях: ему подчиняются рост, вес,

¹ JAMA guide to statistics and methods [Electronic resource]. Режим доступа: <https://jamanetwork.com/collections/44042/jama-guide-to-statistics-and-methods>.

² Медицинская статистика [электронный ресурс]. Общие вопросы статистики. Режим доступа: <https://medstatistic.ru/statistics/statistics3.html>.

размер обуви, а также большое количество других характеристик популяции. Нормальное распределение описывается всего двумя параметрами — средним значением и среднеквадратичным отклонением, и это допущение лежит в основе ряда статистических подходов к проверке гипотез.

Выбор метода проверки распределения на нормальность — задача, не имеющая единственного решения на все случаи жизни. Так, X. Romão и соавт. [15] провели сравнение 33 таких методов и предложили оптимальные решения в зависимости от типа данных. Следует отметить, что выбор метода также зависит от размера исследуемой выборки [16], при этом самыми популярными являются критерий Колмогорова–Смирнова и тест Шапиро–Уилка [17].

Проверка нулевой гипотезы исследования

Помимо типа данных в сравниваемых выборках, корректный метод статистического анализа должен учитывать количество сопоставляемых групп, а также наличие связи между ними. Например, получены ли данные КТ- и НДКТ-исследований для одного и того же пациента или у разных. Различных статистических тестов разработано уже более 50, и для выбора оптимального метода существуют специальные онлайн-ресурсы³.

В нашем примере выборки парные, так как КТ- и НДКТ-данные получены последовательно для одних и тех же пациентов. При нормальном распределении целесообразно использовать парный t-критерий Стьюдента,

а критерий Уилкоксона — при распределении, отличным от нормального.

ПРАКТИЧЕСКИЙ ПРИМЕР

Для проведения статистического анализа были установлены программный пакет R (версия 4.2.2, <https://cloud.r-project.org/>) и интерфейс Posit (версия 353, <https://posit.co/download/rstudio-desktop/>, ранее RStudio).

1. Базовый интерфейс Posit можно разделить на консоль (console), окружение (environment) и файловый менеджер (files) (рис. 1).

Импорт данных осуществляется посредством опции File-Import Dataset. В нашем случае производился импорт таблицы Excel, содержащей данные об эффективных дозах КТ и НДКТ.

После импорта интерфейс программы изменится: в блоке окружения будет отображаться переменная с именем «data» (рис. 2). В левом верхнем квадранте появится также новая область — блок просмотра данных, в котором будет отображаться загруженная таблица. Сравнимые колонки в таблице названы как «Effective Dose (CT)» и «Effective Dose (LDCT)». Использование латиницы в названиях колонок позволяет избежать проблем с кодировкой и некорректным отображением символов в Posit.

Для удобства дальнейшей работы для каждой из этих колонок создадим отдельную переменную, выполнив в консоли команды, приведённые на рис. 3.

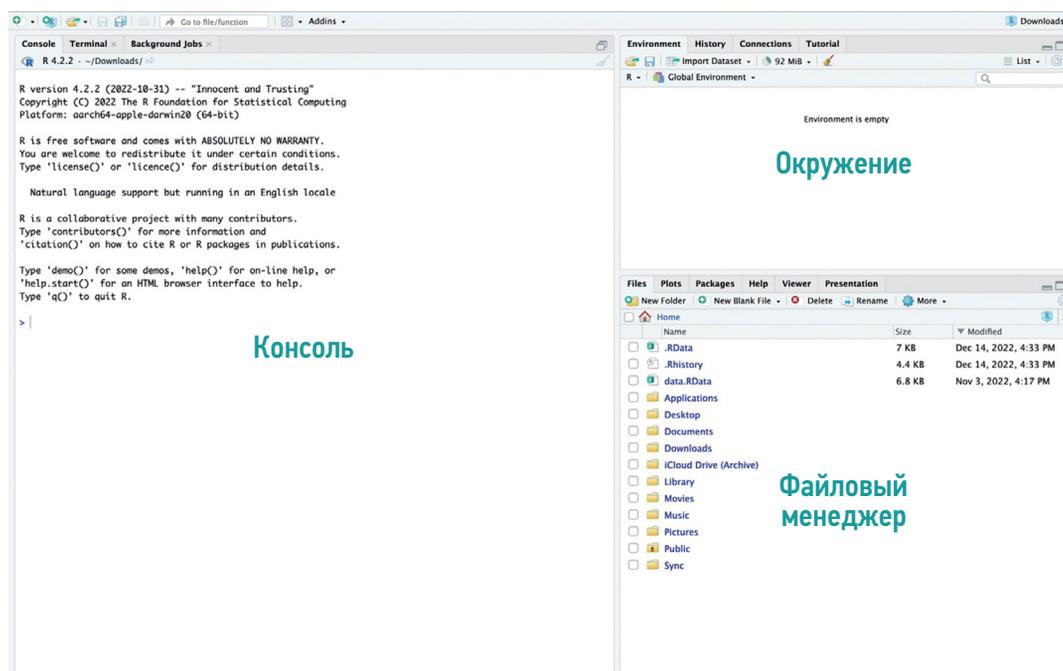


Рис. 1. Интерфейс программы Posit с указанием областей консоли, окружения и файлового менеджера.

³ Statistics online--checks assumptions, interprets results (<https://www.statskingdom.com/>); Медицинская статистика. Выбор метода статистического анализа (<https://medstatistic.ru/calculators/calcchoice.html>).

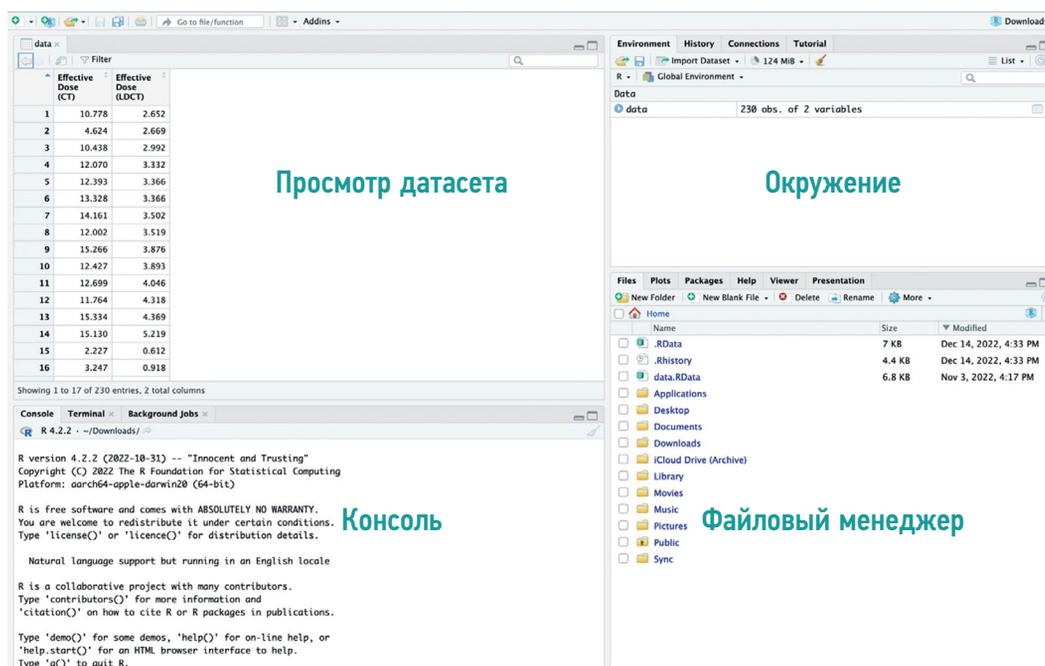


Рис. 2. Интерфейс Posit после импорта файла: в левом верхнем квадранте экрана появилось окно с загруженными столбцами набора данных, а в правом верхнем квадранте указано количество столбцов (variables) и строк (obs., от англ. *observations* — наблюдения).

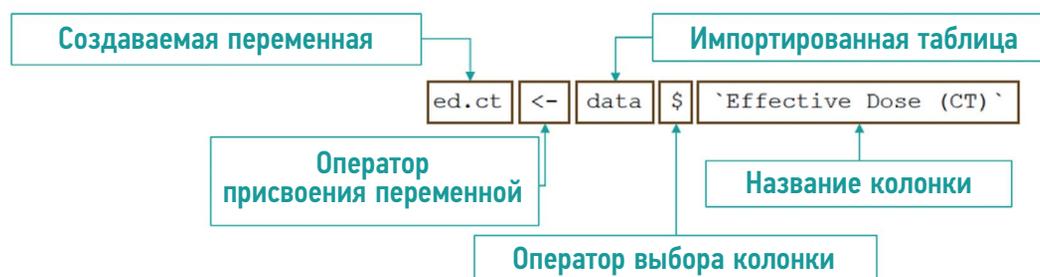


Рис. 3. Создание отдельной переменной для эффективной дозы компьютерной томографии с указанием функции каждого элемента команды.

Использование оператора «\$» (см. рис. 3) отображает выпадающее меню столбцов в импортированной таблице, облегчающее ввод команды. После создания переменных они будут отображаться в правом верхнем квадранте интерфейса как «values» (рис. 4).

2. Проверка нормальности распределения загруженных данных тестом Шапиро–Уилка осуществляется командой `shapiro.test` (рис. 5).

Полученные p -value для обеих переменных значительно меньше выбранного граничного значения $p=0,05$, поэтому распределение данных для эффективной дозы как для КТ, так и НДКТ отличается от нормального. Следовательно, для проверки основной гипотезы исследования целесообразно использовать критерий Уилкоксона.

3. Проверка нулевой гипотезы для связанных количественных выборок с распределением данных, отличных от нормального, выполняется командой `wilcox.test` (рис. 6, 7).

Полученное p -value значительно меньше выбранного граничного значения $p=0,05$, поэтому H_0 можно отвергнуть в пользу H_1 . Это означает, что лучевая нагрузка при КТ и НДКТ статистически значимо отличается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основная задача изложенного материала — познакомить читателя с интерфейсом Posit и базовым функционалом языка R на практическом примере решения реальной медицинской задачи.

В работе кратко обобщены теоретические подходы к обработке медицинских данных, а также рекомендации по корректной формулировке задач исследования и выбору оптимальных методов статистического анализа.

Представленный материал может быть полезен на начальном этапе освоения статистического анализа с помощью инструментов языка R.

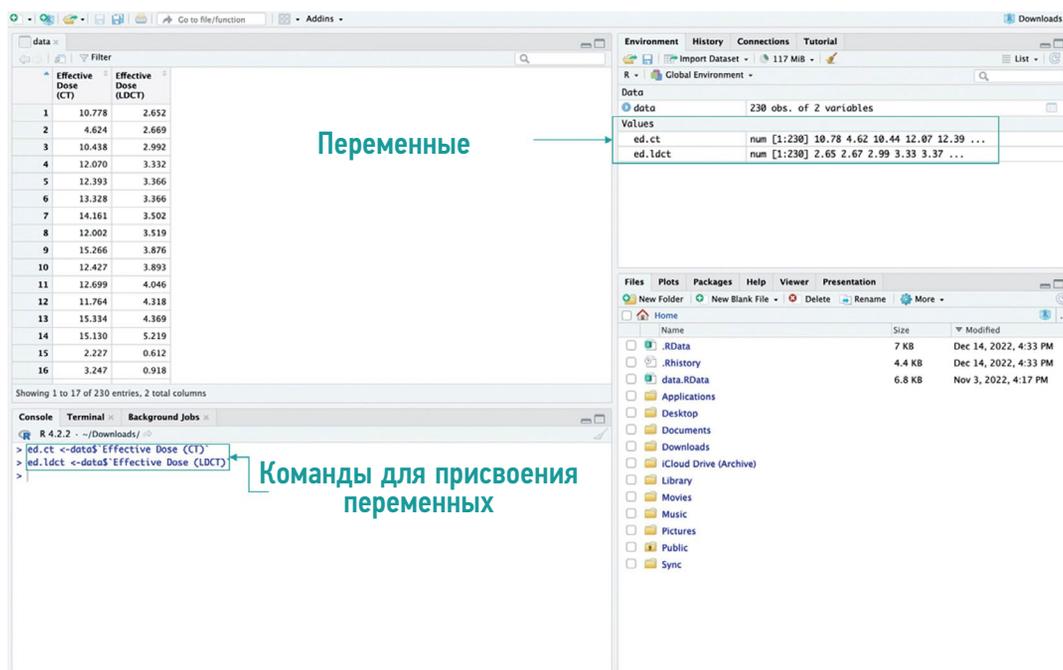


Рис. 4. Окно Posit после импорта файла и присвоения значений переменным: в правом верхнем квадранте появились новые переменные с предпросмотром первых пяти значений в каждой, в левом нижнем квадранте — консольный интерфейс для выполнения команд.

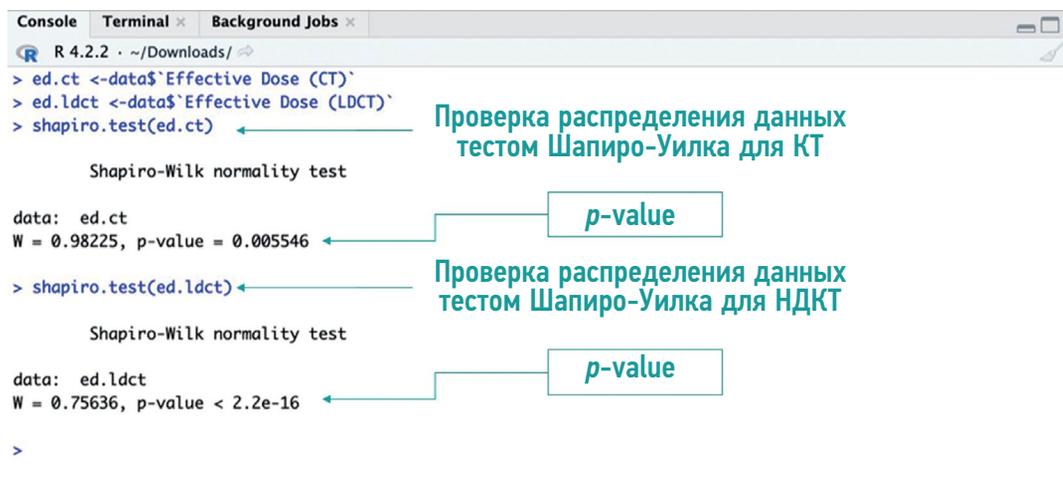


Рис. 5. Область с консольным интерфейсом Posit. Проверка нормальности распределения данных тестом Шапиро–Уилка.

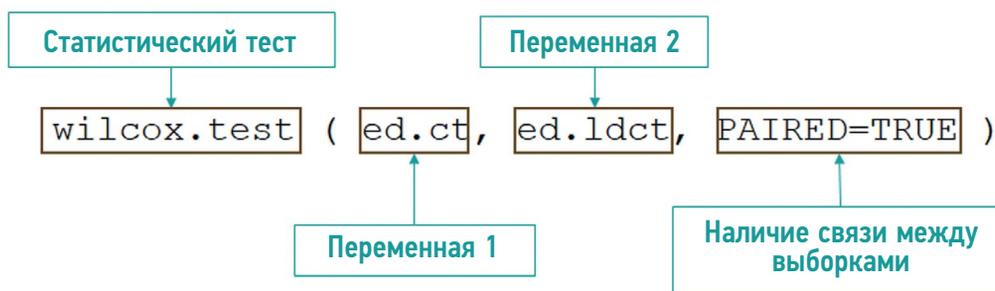


Рис. 6. Проведение теста Уилкоксона с указанием функции каждого элемента команды.

```

R 4.2.2 . ~/Downloads/
> wilcox.test(ed.ct, ed.ldct, PAIRED=TRUE)

Wilcoxon rank sum test with continuity correction

data: ed.ct and ed.ldct
W = 50842, p-value < 2.2e-16
alternative hypothesis: true location shift is not equal to 0
>
  
```

Проверка нулевой гипотезы исследования с помощью критерия Уилкоксона

Рис. 7. Проверка нулевой гипотезы исследования с помощью критерия Уилкоксона.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Источник финансирования. Данная статья подготовлена авторским коллективом в рамках научно-практического проекта в сфере медицины (№ ЕГИСУ: 123031500005-2) «Научное обоснование методов лучевой диагностики опухолевых заболеваний с использованием радиомического анализа».

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 вклад в разработку концепции, проведение поисково-аналитической работы и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распределён следующим образом: И.А. Блохин — написание текста статьи, редактирование и утверждение итогового варианта текста рукописи; М.Р. Коденко, Ю.Ф. Шумская, А.П. Гончар — редактирование и утверждение итогового варианта текста рукописи; Р.В. Решетников — редактирование и утверждение итогового варианта текста рукописи, консультативная поддержка.

ADDITIONAL INFORMATION

Funding source. This article was prepared by a group of authors as a part of the medical research project (No. USIS [in the Unified State Information System for Accounting of Research, Development, and Technological Works]: 123031500005-2) «Scientific rationale for diagnostic radiology in oncology using radiomics».

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.A. Blokhin — writing the text of the article, editing and approval of the final version of the text of the manuscript; M.R. Kodenko, Yu.F. Shumskaya, A.P. Gonchar — editing and approval of the final version of the text of the manuscript; R.V. Reshetnikov — editing and approval of the final version of the text of the manuscript, advisory support.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Emerson J.D., Colditz G.A. Use of statistical analysis in the New England Journal of Medicine // *New Engl J Med*. 1983. Vol. 309, N 12. P. 709–713. doi: 10.1056/NEJM198309223091206
- Ali Z., Bhaskar S.B. Basic statistical tools in research and data analysis // *Indian J Anaesth*. 2016. Vol. 60, N 9. P. 662–669. doi: 10.4103/0019-5049.190623
- Mishra P., Pandey C.M., Singh U., et al. Selection of appropriate statistical methods for data analysis // *Ann Card Anaesth*. 2019. Vol. 22, N 3. P. 297–301. doi: 10.4103/aca.ACA_248_18
- Dwivedi A.K., Shukla R. Evidence-based statistical analysis and methods in biomedical research (SAMBR) checklists according to design features // *Cancer Rep (Hoboken)*. 2020. Vol. 3, N 4. P. e1211. doi: 10.1002/cnr2.1211
- Rigby P.C., German D.M., Cowen L., et al. Peer review on open-source software projects: Parameters, statistical models, and theory // *ACM Trans Softw Eng Methodol*. 2014. Vol. 23, N 4. P. 35.
- Culpepper S.A., Aguinis H. R is for revolution: A cutting-edge, free, open source statistical package // *Organizational Research Methods*. 2011. Vol. 14, N 4. P. 735–740.
- Ihaka R., Gentleman R. R: A language for data analysis and graphics // *J Computational Graphical Statistics*. 1996. Vol. 5, N 3. P. 299–314. doi:10.1080/10618600.1996.10474713
- Niu G., Segall R.S., Zhao Z., et al. A survey of open source statistical software (OSSS) and their data processing functionalities // *Int J Open Source Software Processes*. 2021. Vol. 12, N 1. P. 1–20. doi: 10.4018/IJOSSP.2021010101
- Shatenok M.P., Ryzhov S.A., Lantukh Z.A., et al. Patient dose monitoring software in radiology // *Digital Diagnostics*. 2022. Vol. 3, N 3. P. 212–230. doi: 10.17816/DD106083
- Druzhinina U.V., Ryzhov S.A., Vodovatov A.V., et al. Coronavirus Disease-2019: Changes in computed tomography radiation burden across Moscow medical facilities // *Digital Diagnostics*. 2022. Vol. 3, N 1. P. 5–15. doi: 10.17816/DD87628

11. Gomboleviskiy V., Morozov S., Chernina V., et al. A phantom study to optimise the automatic tube current modulation for chest CT in COVID-19 // *Eur Radiol Exp*. 2021. Vol. 5, N 1. P. 21. doi: 10.1186/s41747-021-00218-0
12. Blokhin I., Gomboleviskiy V., Chernina V., et al. Inter-observer agreement between low-dose and standard-dose CT with soft and sharp convolution kernels in COVID-19 pneumonia // *J Clin Med*. 2022. Vol. 11, N 3. P. 669. doi: 10.3390/jcm11030669
13. Blokhin I.A., Gonchar A.P., Kodenko M., et al. Impact of body mass index on the reliability of the CT0–4 grading system: A comparison of computed tomography protocols: 2 // *Digital Diagnostics*. 2022. Vol. 3, N 2. P. 108–118. doi: 10.17816/DD104358
14. Kennedy-Shaffer L. Before $p < 0.05$ to beyond $p < 0.05$: Using history to contextualize p-values and significance

- testing // *Am Stat*. 2019. Vol. 73, Suppl. 1. P. 82–90. doi: 10.1080/00031305.2018.1537891
15. Romão X., Delgado R., Costa A. An empirical power comparison of univariate goodness-of-fit tests for normality // *J Statist Computation Simulat*. 2010. Vol. 80, N 5. P. 545–591. doi: 10.1080/00949650902740824
16. Lumley T., Diehr P., Emerson S., Chen L. The importance of the normality assumption in large public health data sets // *Ann Rev Pub Health*. 2002. Vol. 23, N 1. P. 151–169. doi: 10.1146/annurev.publhealth.23.100901.140546
17. Mishra P., Pandey C.M., Singh U., et al. Descriptive statistics and normality tests for statistical data // *Ann Card Anaesth*. 2019. Vol. 22, N 1. P. 67–72. doi: 10.4103/aca.ACA_157_18

REFERENCES

1. Emerson J, Colditz GA. Use of statistical analysis in the New England Journal of Medicine. *New Engl J Med*. 1983;309(12):709–713. doi: 10.1056/NEJM198309223091206
2. Ali Z, Bhaskar SB. Basic statistical tools in research and data analysis. *Indian J Anaesth*. 2016;60(9):662–669. doi: 10.4103/0019-5049.190623
3. Mishra P, Pandey CM, Singh U, et al. Selection of appropriate statistical methods for data analysis. *Ann Card Anaesth*. 2019;22(3):297–301. doi: 10.4103/aca.ACA_248_18
4. Dwivedi AK, Shukla R. Evidence-based statistical analysis and methods in biomedical research (SAMBR) checklists according to design features. *Cancer Rep (Hoboken)*. 2020;3(4):e1211. doi: 10.1002/cnr2.1211
5. Rigby PC, German DM, Cowen L, et al. Peer review on open-source software projects: Parameters, statistical models, and theory. *ACM Trans Softw Eng Methodol*. 2014;23(4):35.
6. Culpepper SA, Aguinis H. R is for revolution: A cutting-edge, free, open source statistical package. *Organizational Research Methods*. 2011;14(4):735–740.
7. Ihaka R, Gentleman R. R: A language for data analysis and graphics. *J Computational Graphical Statistics*. 1996;5(3):299–314. doi: 10.1080/10618600.1996.10474713
8. Niu G, Segall RS, Zhao Z, et al. A survey of open source statistical software (OSSS) and their data processing functionalities. *Int J Open Source Software Processes*. 2021;12(1):1–20. doi: 10.4018/IJOSSP.2021010101
9. Shatenok MP, Ryzhov SA, Lantukh ZA, et al. Patient dose monitoring software in radiology. *Digital Diagnostics*. 2022;3(3):212–230. (In Russ). doi: 10.17816/DD106083
10. Druzhinina UV, Ryzhov SA, Vodovatov AV, et al. Coronavirus Disease-2019: Changes in computed tomography radiation burden across Moscow medical facilities. *Digital Diagnostics*. 2022;3(1):5–15. (In Russ). doi: 10.17816/DD87628
11. Gomboleviskiy V, Morozov S, Chernina V, et al. A phantom study to optimise the automatic tube current modulation for chest CT in COVID-19. *Eur Radiol Exp*. 2021;5(1):21. doi: 10.1186/s41747-021-00218-0
12. Blokhin I, Gomboleviskiy V, Chernina V, et al. Inter-observer agreement between low-dose and standard-dose CT with soft and sharp convolution kernels in COVID-19 pneumonia. *J Clin Med*. 2022;11(3):669. doi: 10.3390/jcm11030669
13. Blokhin IA, Gonchar AP, Kodenko M, et al. Impact of body mass index on the reliability of the CT0–4 grading system: A comparison of computed tomography protocols. *Digital Diagnostics*. 2022;3(2):108–118. (In Russ). doi: 10.17816/DD104358
14. Kennedy-Shaffer L. Before $p < 0.05$ to beyond $p < 0.05$: Using history to contextualize p-values and significance testing. *Am Stat*. 2019;73(Suppl. 1):82–90. doi: 10.1080/00031305.2018.1537891
15. Romão X, Delgado R, Costa A. An empirical power comparison of univariate goodness-of-fit tests for normality. *J Statist Computation Simulat*. 2010;80(5):545–591. doi: 10.1080/00949650902740824
16. Lumley T, Diehr P, Emerson S, Chen L. The Importance of the normality assumption in large public health data sets. *Ann Rev Pub Health*. 2002;23(1):151–169. doi: 10.1146/annurev.publhealth.23.100901.140546
17. Mishra P, Pandey CM, Singh U, et al. Descriptive statistics and normality tests for statistical data. *Ann Card Anaesth*. 2019;22(1):67–72. doi: 10.4103/aca.ACA_157_18

ОБ АВТОРАХ

* Блохин Иван Андреевич;

адрес: Россия, 127051, Москва, ул. Петровка, д. 24, стр. 1;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2681-9378>;
eLibrary SPIN: 3306-1387; e-mail: BlockhinIA@zdrav.mos.ru

Коденко Мария Романовна;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0166-3768>;
eLibrary SPIN: 5789-0319; e-mail: KodenkoMR@zdrav.mos.ru

AUTHORS' INFO

* Ivan A. Blokhin;

address: 24/1 Petrovka street, 127051 Moscow, Russia;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2681-9378>;
eLibrary SPIN: 3306-1387; e-mail: BlockhinIA@zdrav.mos.ru

Maria R. Kodenko;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0166-3768>;
eLibrary SPIN: 5789-0319; e-mail: KodenkoMR@zdrav.mos.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Шумская Юлия Федоровна;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8521-4045>;
eLibrary SPIN: 3164-5518; e-mail: ShumskayaYF@zdrav.mos.ru

Гончар Анна Павловна;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5161-6540>;
eLibrary SPIN: 3513-9531; e-mail: GoncharAP@zdrav.mos.ru

Решетников Роман Владимирович, к.ф.-м.н.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9661-0254>;
eLibrary SPIN: 8592-0558; e-mail: r.reshetnikov@gmail.com

Yuliya F. Shumskaya;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8521-4045>;
eLibrary SPIN: 3164-5518; e-mail: ShumskayaYF@zdrav.mos.ru

Anna P. Gonchar;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5161-6540>;
eLibrary SPIN: 3513-9531; e-mail: GoncharAP@zdrav.mos.ru

Roman V. Reshetnikov, Cand. Sci. (Phys-Math);

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9661-0254>;
eLibrary SPIN: 8592-0558; e-mail: r.reshetnikov@gmail.com