

Вестник рентгенологии и радиологии

Рецензируемый научно-практический журнал

Том 105, № 6, 2024

Journal of Radiology and Nuclear Medicine

Peer-Reviewed Scientific and Practical Journal

Vol. 105, No. 6, 2024

Вестник рентгенологии и радиологии

Рецензируемый научно-практический журнал

Журнал включен ВАК в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по специальности 3.1.25. «Лучевая диагностика (медицинские науки)». Официальный журнал Российского общества рентгенологов и радиологов. Представлен в Российском индексе научного цитирования. Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-71544 от 13.11.2017 г.

Периодичность 1 раз в два месяца.

Издательство журнала установило лицензионные отношения в электронном виде с издательством EBSCO Publishing, ведущим мировым агрегатором полных текстов всевозможных журналов и электронных книг. Полный текст статей журнала можно найти в базе данных EBSCOhost™

Учредитель 1:	Общероссийская общественная организация содействия развитию лучевой диагностики и терапии «Российское общество рентгенологов и радиологов»
Адрес:	129344, г. Москва, ул. Верхоянская, д. 18, корп. 2, эт. 0, пом. 2, ком. 4
Учредитель 2:	Общество с ограниченной ответственностью «ЛУЧЕВАЯ ДИАГНОСТИКА»
Адрес:	121552, Москва, ул. Ярцевская, д. 34, корп. 1, эт. 2, пом. I, комн. 7, оф. 33
Издатель:	Общество с ограниченной ответственностью «ЛУЧЕВАЯ ДИАГНОСТИКА» 121552, Москва, ул. Ярцевская, д. 34, корп. 1, эт. 2, пом. I, комн. 7, оф. 33
Стоимость:	Свободная цена
Адрес редакции, телефон:	121552, Москва, ул. Ярцевская, д. 34, корп. 1, эт. 2, пом. I, комн. 7, оф. 33, тел.: +7 (985) 120-70-06
Подписной индекс:	81601 – в каталоге «Урал-Пресс»

Подписку на печатный экземпляр журнала можно оформить на сайте www.ural-press.ru

Полная электронная версия статей журнала размещается на сайтах: <https://www.elibrary.ru>, <https://www.iprbooks.ru>,
<https://rucont.ru>, <https://www.ebsco.com>, <https://cyberleninka.ru>

Главный редактор

Тюрин И.Е., д. м. н., профессор, заведующий кафедрой рентгенологии и радиологии ФГБОУ ДПО «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования» Минздрава России, Москва

Редакционная коллегия

Абельская И.С., д. м. н., профессор, Минск, Беларусь
Балахонова Т.В., д. м. н., профессор, Москва, Россия
Даутов Т.Б., д. м. н., профессор, Нур-Султан, Республика Казахстан
Дмитриева Л.И., к. м. н., Москва, Россия
Коновалов Р.Н., к. м. н., доцент, Москва, Россия
Лисицкая М.В., к. м. н., ответств. секретарь, Москва, Россия
Михайлов А.Н., д. м. н., профессор, акад. Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
Морозов А.К., д. м. н., профессор, Москва, Россия
Низовцова Л.А., д. м. н., профессор, Москва, Россия
Нуднов Н.В., д. м. н., профессор, Москва, Россия
Осиев А.Г., д. м. н., профессор, Москва, Россия
Ратников В.А., д. м. н., профессор, Санкт-Петербург, Россия
Ридэн Т.В., д. м. н., профессор, Людвигсхафен-на-Рейне, Германия
Рожкова И.И., д. м. н., профессор, Москва, Россия

Сергиенко В.Б., д. м. н., профессор, Москва, Россия
Синицын В.Е., д. м. н., профессор, зам. главного редактора, Москва, Россия
Солодкий В.А., д. м. н., профессор, акад. РАН, Москва, Россия
Сташук Г.А., д. м. н., профессор, Москва, Россия
Терновой С.К., д. м. н., профессор, акад. РАН, 1-й зам. главного редактора, Москва, Россия
Черкавская О.В., д. м. н., заведующая редакцией, Москва, Россия
Шария М.А., д. м. н., профессор, Москва, Россия
Boris Brkljacic, Dr. Med. Sc., Professor, Zagreb, Croatia
Michael H. Fuchsjaeger, Dr. Med. Sc., Professor, Graz, Austria,
Nicholas C. Gourtsoyiannis, Dr. Med. Sc., Professor, Crete, Greece
Andrei I. Holodny, Dr. Med. Sc., Professor, New York, USA
Ruzica Maksimovic, Dr. Med. Sc., Professor, Belgrade, Serbia
Maximilian F. Reiser, Dr. Med. Sc., Professor, Munich, Germany
Jacob Sosna, Dr. Med. Sc., Professor, Jerusalem, Israel

Journal of Radiology and Nuclear Medicine

Vestnik rentgenologii i radiologii

Peer-Reviewed Scientific and Practical Journal

Founded in 1920.

Official Journal of Russian Society of Radiology.

Journal is indexed in RSCI (Russian Science Citation Index).

Issued bimonthly.

The journal accepts articles on specialty 3.1.25. "Radiation Diagnostics (medical sciences)". Registered with the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media. Registration certificate PI No. FS77-71544, November 13, 2017.

Publisher has entered into an electronic licensing relationship with EBSCO Publishing, the world's leading aggregator of full text journals, magazines and eBooks. The full text of journal can be found in the EBSCOhost™ databases

Founder 1:	Russian Society of Radiology
Address:	129344, Moscow, Verkhoyanskaya street, 18, bld. 2, floor 0, apartment 2, room 4
Founder 2:	Limited Liability Company "LUCHEVAYA DIAGNOSTIKA"
Address:	121552, Moscow, Yartsevskaya str., 34, bld. 1, floor 2, apartment 1, room 7, office 33
Publisher:	Limited Liability Company "LUCHEVAYA DIAGNOSTIKA"
	121552, Moscow, Yartsevskaya str., 34, bld. 1, floor 2, apartment 1, room 7, office 33
The cost of one issue:	Free price
Address, phone of edition:	121552, Moscow, Yartsevskaya str., 34, bld. 1, floor 2, apartment 1, room 7, office 33, phone: +7 (985) 120-70-06
Subscription index:	81601 – in the Ural-Press catalog

You can subscribe to a printed copy of the journal on the website <https://www.ural-press.ru/>

The full electronic version of the journal articles is published on the websites: <https://www.elibrary.ru>, <https://www.iprbooks.ru>,
<https://www.rucont.ru>, <https://www.ebsco.com>, <https://cyberleninka.ru>

Editor-in-Chief

Igor' E. Tyurin, Dr. Med. Sc., Professor, Head of Chair of Radiology and Nuclear Medicine, Russian Medical Academy of Continuing Professional Education, Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation

Editorial board

Irina S. Abelskaya, Dr. Med. Sc., Professor, Minsk, Belarus
Tatiana V. Balakhonova, Dr. Med. Sc., Professor, Moscow, Russia
Tairkhan B. Dautov, Dr. Med. Sc., Professor, Nur-Sultan, Kazakhstan
Lyudmila I. Dmitrieva, Cand. Med. Sc., Moscow, Russia
Rodion N. Konovalov, Cand. Med. Sc., Associate Professor, Moscow, Russia
Maria V. Lisitskaya, Cand. Med. Sc., Executive secretary, Moscow, Russia
Anatoly N. Mikhaylov, Dr. Med. Sc., Professor, Academician of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
Aleksandr K. Morozov, Dr. Med. Sc., Professor, Moscow, Russia
Lyudmila A. Nizovtsova, Dr. Med. Sc., Professor, Moscow, Russia
Nikolay V. Nudnov, Dr. Med. Sc., Professor, Moscow, Russia
Aleksandr G. Osiev, Dr. Med. Sc., Professor, Moscow, Russia
Vyacheslav A. Ratnikov, Dr. Med. Sc., Professor, St. Petersburg, Russia
Tatiana V. Riden, Dr. Med. Sc., Professor, Ludwigshafen am Rhein, Germany
Nadezhda I. Rozhkova, Dr. Med. Sc., Professor, Moscow, Russia
Vladimir B. Sergienko, Dr. Med. Sc., Professor, Moscow, Russia

Valentin E. Sinitsyn, Dr. Med. Sc., Professor, Deputy editor, Moscow, Russia
Vladimir A. Solodkiy, Dr. Med. Sc., Professor, Academician of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
Galina A. Stashuk, Dr. Med. Sc., Professor, Moscow, Russia
Sergey K. Ternovoy, Dr. Med. Sc., Professor, Academician of Russian Academy of Sciences, 1st Deputy editor, Moscow, Russia
Olga V. Cherkavskaya, Dr. Med. Sc., Head of Editorial Board, Moscow, Russia
Merab A. Shariya, Dr. Med. Sc., Professor, Moscow, Russia
Boris Brkljacic, Dr. Med. Sc., Professor, Zagreb, Croatia
Michael H. Fuchsjaeger, Dr. Med. Sc., Professor, Graz, Austria
Nicholas C. Gourtsoyiannis, Dr. Med. Sc., Professor, Crete, Greece
Andrei I. Holodny, Dr. Med. Sc., Professor, New York, USA
Ruzica Maksimovic, Dr. Med. Sc., Professor, Belgrade, Serbia
Maximilian F. Reiser, Dr. Med. Sc., Professor, Munich, Germany
Jacob Sosna, Dr. Med. Sc., Professor, Jerusalem, Israel

Оригинальные статьи**Халилов М.А., Мошкин А.С., Олейниченко А.П., Мошкина Л.В.**

Различия в формировании локальных атеросклеротических изменений дуги аорты298

Клинические случаи**Демьянов А.П., Долгушин М.Б., Ростовцева Т.М.**Венозный инфаркт мозжечка в сочетании с венозной аномалией развития
и тромбозом мозговых синусов с противоположной стороны307**Ельшибаева Э.С., Суйгенбаева А.Ж., Мергалимова А.Б., Оспанова Ж.Б.**Левamisол-индуцированная лейкоэнцефалопатия: редкий случай
побочного действия препарата.....314Обзоры**Нуднов Н.В., Паньшин Г.А.**Современное клиническое применение искусственного интеллекта
в медицинской визуализации325**Воробьева В.О., Тюрин И.Е.**Текстурный анализ КТ-изображений в дифференциальной диагностике
немелкоклеточного рака легкого335

Original research**Maksud A. Khalilov, Andrey S. Moshkin, Anton P. Oleynichenko, Lyubov V. Moshkina**

Differences in the Development of Local Atherosclerotic Changes in the Aortic Arch 298

Case reports**Aleksej P. Demyanov, Mikhail B. Dolgushin, Tatiana M. Rostovtseva**Cerebellar Venous Infarction Combined with Developmental Venous Anomaly
and Contralateral Sinus Thrombosis..... 307**Elmira S. Yelshibayeva, Aigerim Zh. Suigenbayeva, Akerke B. Mergalimova,
Zhanar B. Ospanova**

Levamisole-induced leukoencephalopathy: a rare drug side effect..... 314

Reviews**Nikolay V. Nudnov, Georgiy A. Pan'shin**

Current Clinical Application of Artificial Intelligence in Medical Imaging 325

Valentina O. Vorobeva, Igor E. Tyurin

Texture Analysis of CT Images in Differential Diagnosis of Non-Small Cell Lung Cancer..... 335



Различия в формировании локальных атеросклеротических изменений дуги аорты

Халилов М.А.¹, Мошкин А.С.^{1,2}, Олейниченко А.П.^{1,3}, Мошкина Л.В.¹

¹ ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева»

ул. Комсомольская, 95, Орел, 302026, Российская Федерация

² ООО «Хеликс Орел»,

ул. Максима Горького, 47, Орел, 302040, Российская Федерация

³ БУЗ Орловской области «Городская больница им. С.П. Боткина»,

ул. Металлургов, 80, Орел, 302029, Российская Федерация

Халилов Максуд Абдуразакович, д. м. н., профессор, заведующий кафедрой анатомии, оперативной хирургии и медицины катастроф ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева»;

<http://orcid.org/0000-0003-3529-0557>

Мошкин Андрей Сергеевич, к. м. н., доцент кафедры анатомии, оперативной хирургии и медицины катастроф ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева», врач ультразвуковой диагностики ООО «Хеликс Орел»;

<http://orcid.org/0000-0003-2085-0718>

Олейниченко Антон Павлович, ассистент кафедры анатомии, оперативной хирургии и медицины катастроф ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева», врач-рентгенолог БУЗ Орловской области «Городская больница им. С.П. Боткина»;

<http://orcid.org/0009-0008-8526-7236>

Мошкина Любовь Викторовна, ассистент кафедры анатомии, оперативной хирургии и медицины катастроф ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева»;

<http://orcid.org/0009-0008-1328-1880>

Резюме

Цель: изучить динамику и закономерности развития атеросклеротических изменений дуги аорты на основании данных компьютерной томографии.

Материал и методы. Изучены данные компьютерной томографии 158 человек, полученных на аппарате Philips Ingenuity CT без контрастирования. Дуга аорты разделена на части: I часть – до плечевого ствола, II часть – до левой подключичной артерии, III часть – дистальнее левой подключичной артерии. Положение локальных атеросклеротических изменений определялось по часовой стрелке с разделением аорты на 24 сектора. Данные группировались и подвергались статистической обработке.

Результаты. Выделены группы пациентов по возрасту: 1-я группа – до 55 лет, 2-я группа – от 56 до 70 лет, 3-я группа – старше 71 года. Количественная оценка выраженности изменений стенки дуги аорты основана на расчете общего количества вовлеченных секторов среди участников групп, уровень значимости соответствовал $p < 0,05$. Выявлены схожие проявления атеросклероза дуги аорты, при этом локализация не связана с полом участников наблюдения. Наименьшее количество изменений обнаружено в I части дуги аорты, наибольшее – в III части, с увеличением в старших возрастных группах.

Заключение. Атеросклеротические изменения в I части дуги аорты наиболее часто выявляются в верхней полуокружности (секторы 22–24). Во II части более часто изменения находились в правой полуокружности (секторы 15–22). В III части дуги аорты изменения наиболее выражены в нижних отделах и слева (секторы 6–14). Расположение локальных изменений стенки дуги аорты у мужчин и женщин различается слабо.

Ключевые слова: аорта; атеросклероз; компьютерная томография.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева» в рамках государственного задания № 075-00195-25-00 на 2025 год и на плановый период 2026 и 2027 годов, проект FSGN-2024-0014 (1024041900023-6-3.1.3;3.2.12;3.2.4).

Для цитирования: Халилов М.А., Мошкин А.С., Олейниченко А.П., Мошкина Л.В. Различия в формировании локальных атеросклеротических изменений дуги аорты. Вестник рентгенологии и радиологии. 2024; 105(6): 298–306. <https://doi.org/10.20862/0042-4676-2024-105-6-298-306>

Для корреспонденции: Мошкин Андрей Сергеевич, E-mail: as.moshkin@internet.ru

Статья поступила 19.06.2025

После доработки 28.06.2025

Принята к печати 30.06.2025

Differences in the Development of Local Atherosclerotic Changes in the Aortic Arch

Maksud A. Khalilov¹, Andrey S. Moshkin^{1,2}, Anton P. Oleynichenko^{1,3}, Lyubov V. Moshkina¹

¹ Oryol State University named after I.S. Turgenev,
ul. Komsomolskaya, 95, Oryol, 302026, Russian Federation

² Helix Orel LLC,
ul. Maksima Gorkogo, 47, Oryol, 302040, Russian Federation

³ Botkin City Hospital,
ul. Metallurgov, 80, Oryol, 302029, Russian Federation

Maksud A. Khalilov, Dr. Med. Sc., Professor, Chief of Chair of Anatomy, Operative Surgery and Disaster Medicine, Oryol State University named after I.S. Turgenev;
<http://orcid.org/0000-0003-3529-0557>

Andrey S. Moshkin, Cand. Med. Sc., Associate Professor, Chair of Anatomy, Operative Surgery and Disaster Medicine, Oryol State University named after I.S. Turgenev; Ultrasound Diagnostician, Helix Orel LLC;
<http://orcid.org/0000-0003-2085-0718>

Anton P. Oleynichenko, Assistant Professor, Chair of Anatomy, Operative Surgery and Disaster Medicine, Oryol State University named after I.S. Turgenev; Radiologist, Botkin City Hospital;
<http://orcid.org/0009-0008-8526-7236>

Lyubov V. Moshkina, Assistant Professor, Chair of Anatomy, Operative Surgery and Disaster Medicine, Oryol State University named after I.S. Turgenev;
<http://orcid.org/0009-0008-1328-1880>

Abstract

Objective: to study the dynamic and patterns of atherosclerotic changes in the aortic arch using computed tomography data.

Material and methods. The computed tomography data of 158 patients obtained at the Philips Ingenuity CT scanner without contrast were studied. The aortic arch was divided into three parts: Part I – up to the brachiocephalic artery, Part II – up to the left subclavian artery, and Part III – distal to the left subclavian artery. The position of the local atherosclerotic lesions was determined by dividing the aorta into 24 segments. The data were grouped and statistically analyzed.

Results. Three age groups were identified: Group 1 – up to 55 years, Group 2 – 56–70 years, and Group 3 – over 70 years. The severity of aortic wall changes was assessed quantitatively by calculating the total number of affected segments among participants in each group. The significance level was $p < 0.05$. Similar patterns of aortic atherosclerosis were found, but the location was not related to gender. The least number of lesions was in Part I of the arch, and the greatest was in Part III. There was an increase with age.

Conclusion. Atherosclerotic disease of the aortic arch is most commonly found in the upper half (segments 22–24) of Part I. In Part II, it was more frequent in the right half (segments 15–22). In Part III, the lesions were most pronounced in lower segments and on the left (segments 6–14). The location of lesions in men and women was slightly different.

Keywords: aorta; atherosclerosis; computed tomography.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Funding. The work was performed at the Oryol State University named after I.S. Turgenev within the framework of state assignment No. 075-00195-25-00 for 2025 and for the planning period of 2026 and 2027, the FSGN project-2024-0014 (1024041900023-6-3.1.3;3.2.12;3.2.4).

For citation: Khalilov MA, Moshkin AS, Oleynichenko AP, Moshkina LV. Differences in the development of local atherosclerotic changes in the aortic arch. *Journal of Radiology and Nuclear Medicine*. 2024; 105(6): 298–306 (in Russian). <https://doi.org/10.20862/0042-4676-2024-105-6-298-306>

For corresponding: Andrey S. Moshkin, E-mail: as.moshkin@internet.ru

Received June 19, 2025

Revised June 28, 2025

Accepted June 30, 2025

Введение / Introduction

В настоящее время сохраняется преобладание патологии системы органов кровообращения, приводящее к снижению трудоспособности и смертности среди населения. Причины развития этих

заболеваний характеризуются выраженной полиэтиологичностью и часто ассоциированы с возрастом пациентов [1].

Положительное влияние на снижение смертности оказывают новые малоинвазивные и вы-

сокотехнологичные методы лечения, совершенствование профилактических мероприятий среди населения [2–5]. При этом одной из важнейших проблем является ранняя диагностика и лечение болезней сердца и крупных сосудов. В клинической практике развитие атеросклероза на уровне магистральных артерий выступает в роли диагностического маркера при оценке прогнозов развития нарушений в системах коронарных и каротидных артерий [6–9].

Компьютерная томография (КТ) получила широкое распространение как высокоэффективный метод диагностики заболеваний органов грудной полости. Он позволяет выявлять значимые изменения магистральных артерий, развивающиеся вследствие атеросклероза, особенно при формировании локального кальциноза [10]. Изучение индивидуальных особенностей развития атеросклероза в области дуги аорты и ее ветвей – чрезвычайно актуальная проблема при планировании современных оперативных вмешательств [11]. Хирургам приходится учитывать особенности локальных изменений и анатомическую изменчивость магистральных сосудов при поиске наилучшего метода лечения [12]. Развитие компьютерных технологий и трехмерной печати позволяет создавать объемные модели на основе данных КТ, учитывать индивидуальные особенности взаимного положения магистральных сосудов до начала выполнения оперативного лечения [13].

Значительная индивидуальная изменчивость ветвей дуги аорты приводит к необходимости создания многобланшевых и гибридных протезов, обеспечивающих более широкие возможности при выполнении операций [14, 15]. Эндоваскулярные методы лечения заболеваний восходящего отдела и дуги аорты снижают время пребывания в стационаре, позволяют одновременно проводить вмешательства на дуге аорты, клапанах сердца, а также коронарное шунтирование [16–18].

Цель – изучить динамику и закономерности развития атеросклеротических изменений дуги аорты на основании данных КТ.

Материал и методы / Material and methods

Изучены данные КТ 158 человек (82 женщины и 76 мужчин) в возрасте от 24 до 93 лет, полученные на аппарате Philips Ingenuity CT без контрастирования. Структуру дуги аорты оценивали на реконструированных изображениях во фронтальной плоскости, ориентированных перпендикулярно ходу сосуда и отображающих поперечное сечение просвета аорты с минимальным искажением в пространстве.

При проведении исследования у дуги аорты были выделены три части справа налево: I часть – до плечевого ствола, II часть – до левой под-

ключичной артерии, III часть – дистальнее левой подключичной артерии. Оценку положения локальных атеросклеротических изменений выполняли на диагностических изображениях поперечного среза сосуда с разделением его на 24 сектора (рис. 1). Каждый сектор соответствовал 15° окружности изучаемого сосуда. Сектор 1 занимал наивысшее положение (353–358°) окружности, сектор 12 определялся наиболее низко (158–143°). Секторы 2–11 соответствовали левой стороне и передней полуокружности реконструированного изображения дуги аорты, а секторы 13–23 – дорзальной полуокружности сосуда.

Полученные в результате анализа результаты регистрировали в электронных таблицах MS Excel 2007, проводили статистический анализ в программе IBM SPSS Statistics 20. Оценку непараметрических критериев выполняли с расчетом критерия Краскела–Уоллиса и определением доверительных интервалов для биномиального распределения. Для количественных показателей изменений в различных группах с учетом возраста и пола применяли t-критерий Стьюдента.

Результаты / Results

В связи с тем что в процессе анализа изображений наиболее ранние признаки изменений стенки аорты у женщин были отмечены с возраста 55 лет, а у мужчин с 41 года, были сформированы три возрастные группы участников:

- 1-я группа – пациенты в возрасте до 55 лет;
- 2-я группа – пациенты в возрасте от 56 до 70 лет;

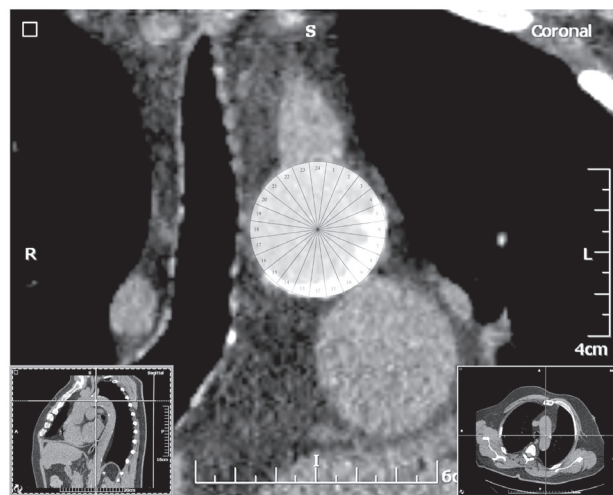


Рис. 1. Пациент 69 лет. Изменения во II части дуги аорты на уровне секторов 4–15 (фрагмент компьютерной томограммы – реконструированное изображение поперечного сечения дуги аорты)

Fig. 1. Male patient aged 69 years. Changes in Part II of the aortic arch at the level of sectors 4–15 (computed tomogram fragment – reconstructed image of aortic arch cross-section)

– 3-я группа – пациенты старше 71 года.

Распределение результатов изучения изменений структуры стенки на разных участках дуги аорты приведено на рисунке 2.

Представленные результаты были валидны при проверке их достоверности по методу определения доверительных интервалов для биномиального распределения ($p < 0,05$).

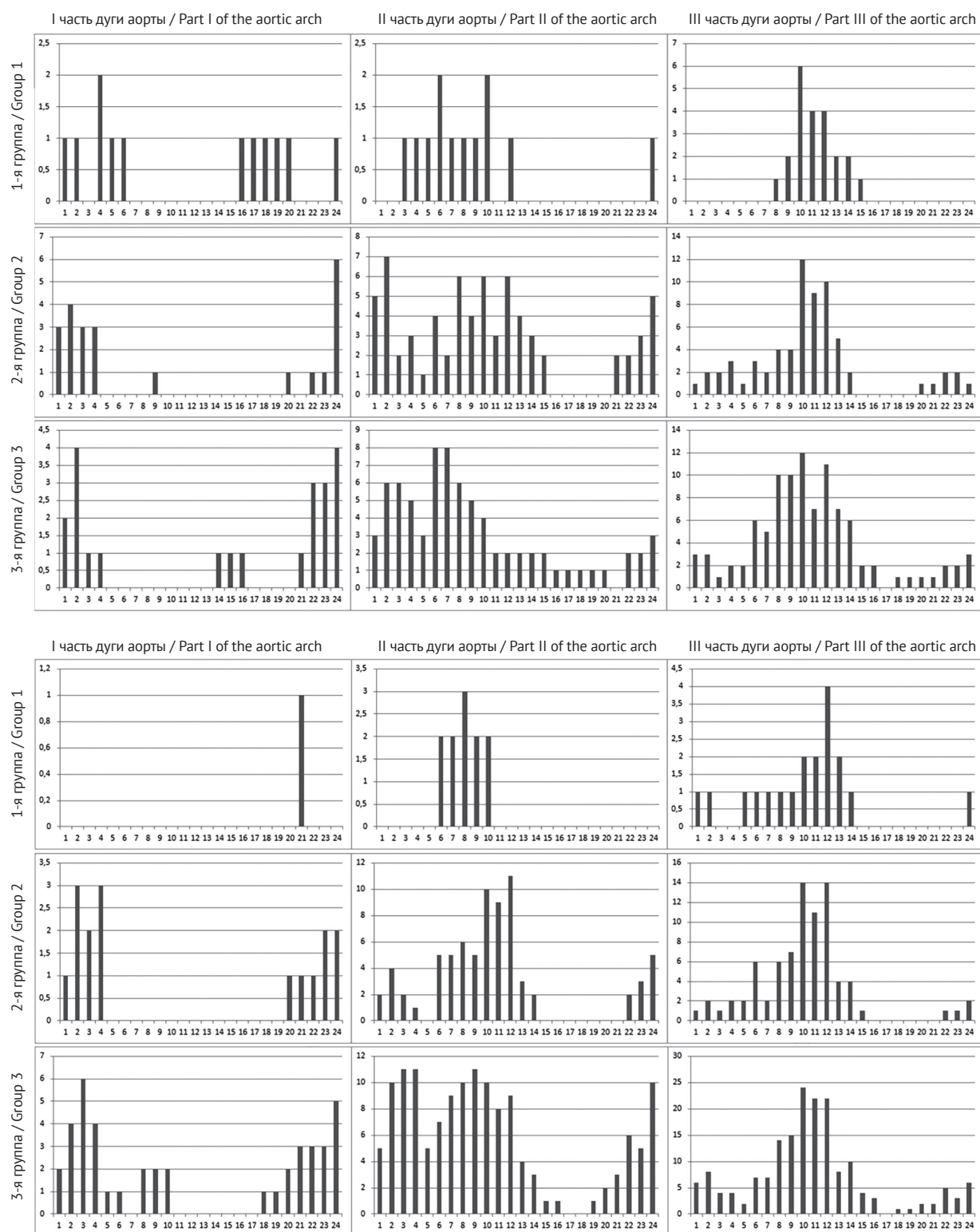


Рис. 2. Распределение и локализация изменений в различных частях дуги аорты: а – пациенты мужского пола; б – пациенты женского пола

Fig. 2. Distribution and localization of changes in different parts of the aortic arch: а – male patients; б – female patients

Таблица 1

Распределение изменений в различных отделах дуги аорты с учетом пола и возраста участников

Table 1

Distribution of changes in different parts of the aortic arch depending on gender and age of the participants

Возраст / Age	Часть дуги аорты / Part of the aortic arch		
	I	II	III
Мужчины / Males			
1-я группа / Group 1	4,0±0,7	2,0±0,6	3,1±1,1
2-я группа / Group 2	2,1±1,0	4,7±2,5	4,5±2,4
3-я группа / Group 3	3,7±1,8	5,4±3,3	6,7±3,0
Женщины / Females			
1-я группа / Group 1	1,0±0,1	3,7±0,9	3,8±1,4
2-я группа / Group 2	2,7±0,9	3,7±2,2	3,5±1,7
3-я группа / Group 3	2,8±1,5	5,9±3,1	6,9±3,1

Количественная оценка выраженности изменений стенки дуги аорты в группах была основана на расчете общего количества вовлеченных секторов среди участников групп, результат представлен в таблице 1. При оценке значимости различий выявления атеросклеротических изменений на уровне различных частей аорты в группах наблюдения с помощью критерия Краскела–Уоллиса уровень значимости соответствовал $p < 0,05$.

При сравнении возрастных групп, включающих мужчин и женщин, различия между значениями по t-критерию Стьюдента во всех случаях соответствовали $p < 0,05$. В свою очередь, сравнение различий между количественными показателями для групп мужчин и женщин продемонстрировало отсутствие статистически значимых результатов как среди участников одного возраста ($p > 0,05$), так и для изменений, выявленных на одном уровне дуги аорты ($p > 0,05$). Детальное описание статистической значимости различий между изменениями для участников с учетом пола и локализации изменений приведено в таблице 2.

Таблица 2

Значения p при расчете t-критерия Стьюдента для количественных показателей изменений в различных группах с учетом возраста и пола

Table 2

Student's t-test p-values for quantitative measures of change in different groups depending on age and gender

Пол / Gender	Возраст / Age	I часть дуги аорты / I part of the aortic arch			II часть дуги аорты / II part of the aortic arch			III часть дуги аорты / III part of the aortic arch		
		1-я группа / Group 1	2-я группа / Group 2	3-я группа / Group 3	1-я группа / Group 1	2-я группа / Group 2	3-я группа / Group 3	1-я группа / Group 1	2-я группа / Group 2	3-я группа / Group 3
Мужчины / Males										
Жен- щины / Females	1-я группа / Group 1	0,261*	0,016	0,009	0,718*	0,010	0,002	0,730*	0,100	<0,001
	2-я группа / Group 2	0,833*	0,360*	0,070*	0,001	0,857*	0,018	0,001	0,823*	0,005
	3-я группа / Group 3	0,090*	0,064*	0,772*	<0,001	0,002	0,696*	<0,001	<0,001	0,757*
Муж- чины / Males	1-я группа / Group 1	–	0,299*	0,073*	–	0,001	<0,001	–	0,026	<0,001
	2-я группа / Group 2	0,299*	–	0,243*	0,001	–	0,033	0,026	–	0,001
Женщины / Females										
Жен- щины / Females	1-я группа / Group 1	–	0,135*	<0,001	–	0,012	<0,001	–	0,010	<0,001
	2-я группа / Group 2	0,135*	–	0,008	0,012	–	0,001	<0,001	–	<0,001

Примечание. * Статистически незначимые различия.

Note. * Statistically insignificant differences.

Обсуждение / Discussion

Полученные данные демонстрируют схожие проявления при диагностике атеросклеротических изменений дуги аорты (рис. 3–5), при этом их локализация не связана с полом участников наблюдения. В I части дуги аорты изменения наиболее часто определялись на уровне секторов 1–4 и 22–24 среди мужчин и секторов 1–4 и 21–24 среди женщин. Во II части у мужчин изменения дуги аорты чаще выявлялись на уровне секторов 1–15 и 22–24, у женщин – на уровне секторов 2–12 и 22–24. В III части дуги аорты для мужчин и женщин наиболее часто изменения диагностировались в секторах 6–14 (см. рис. 2).

При сравнении данных о локализации изменений между группами мужчин и женщин не было отмечено значимых различий у участников одного возраста.

Оценка количественных характеристик выраженности атеросклеротических изменений показала наименьшее их количество в I части дуги аорты и наибольшее – в III части, с увеличением в старших возрастных группах (рис. 6).

Статистический анализ по признакам количественной выраженности проявлений атеросклероза продемонстрировал отсутствие значимых различий в I части дуги аорты в 1-й возрастной группе участников. Среди мужчин значимых различий не

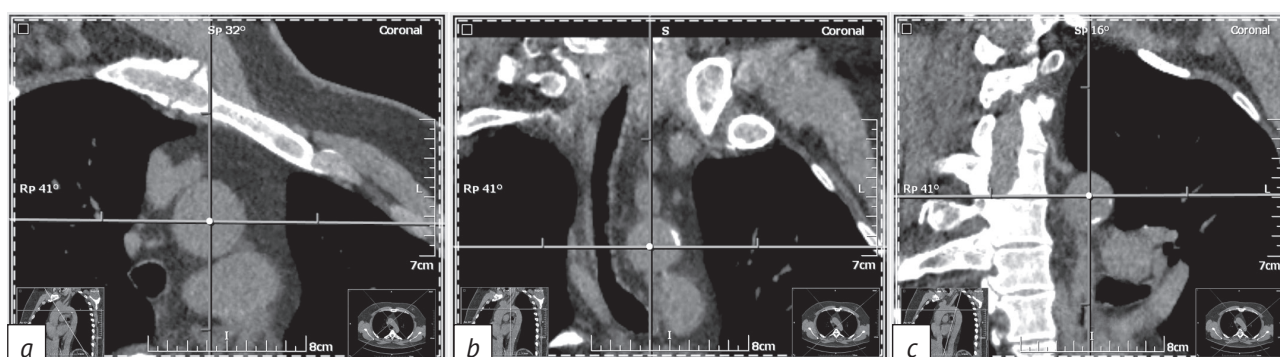


Рис. 3. Пациент 53 лет (1-я возрастная группа). Изменения дуги аорты (фрагменты компьютерной томограммы – реконструированные изображения поперечного сечения дуги аорты):
а – без значимо выраженных изменений (I часть дуги аорты); б – на уровне секторов 4–6 (II часть дуги аорты); в – на уровне секторов 6–7, 10–12 (III часть дуги аорты)

Fig. 3. Male patient aged 53 years (Group 1). Changes in the aortic arch (fragments of a computed tomogram – reconstructed images of the aortic arch cross-section):

а – no significant changes (Part I of the aortic arch); б – at the level of sectors 4–6 (Part II of the aortic arch); в – at the level of sectors 6–7, 10–12 (Part III of the aortic arch)

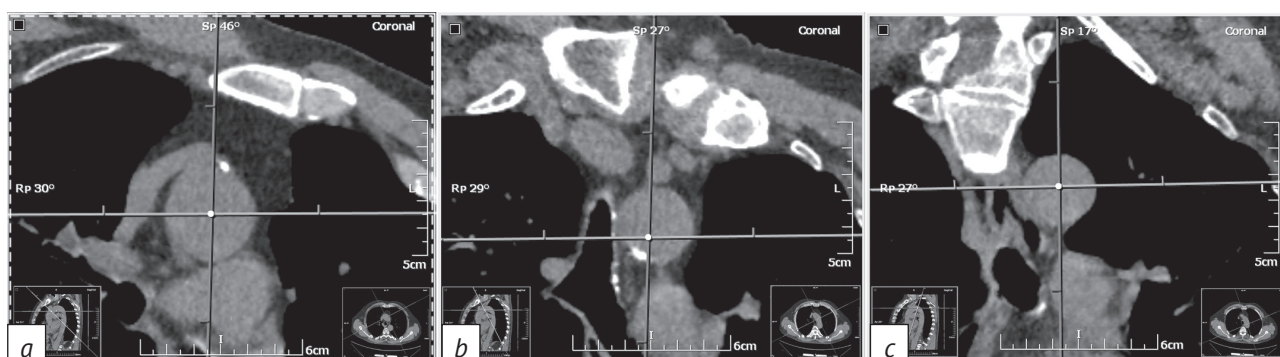


Рис. 4. Пациент 63 лет (2-я возрастная группа). Изменения дуги аорты (фрагменты компьютерной томограммы – реконструированные изображения поперечного сечения дуги аорты):
а – на уровне сектора 1 (I часть дуги аорты); б – на уровне секторов 13–15 (II часть дуги аорты); в – без значимо выраженных изменений (III часть дуги аорты)

Fig. 4. Male patient aged 63 years (Group 2). Changes in the aortic arch (fragments of a computed tomogram – reconstructed images of the aortic arch cross-section):

а – at the level of sector 1 (Part I of the aortic arch); б – at the level of sectors 13–15 (Part II of the aortic arch); в – no significant changes (Part III of the aortic arch)

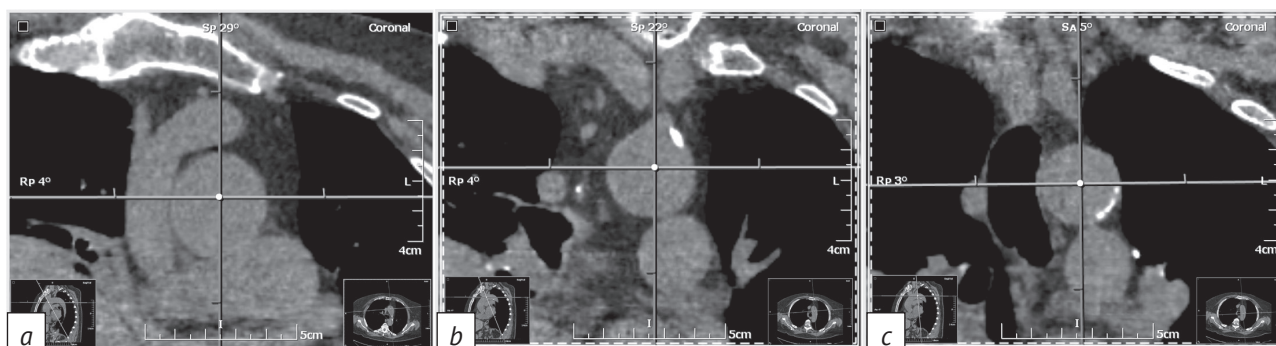


Рис. 5. Пациентка 65 лет (2-я возрастная группа). Изменения дуги аорты (фрагменты компьютерной томограммы – реконструированные изображения поперечного сечения дуги аорты):

a – без значимо выраженных изменений (I часть дуги аорты); *b* – на уровне секторов 2–3 (II часть дуги аорты); *c* – на уровне секторов 6–10 (III часть дуги аорты)

Fig. 5. Female patient aged 65 years (Group 2). Changes in the aortic arch (fragments of a computed tomogram – reconstructed images of the aortic arch cross-section):

a – no significant changes (Part I of the aortic arch); *b* – at the level of sectors 2–3 (Part II of the aortic arch); *c* – at the level of sectors 6–10 (Part III of the aortic arch)

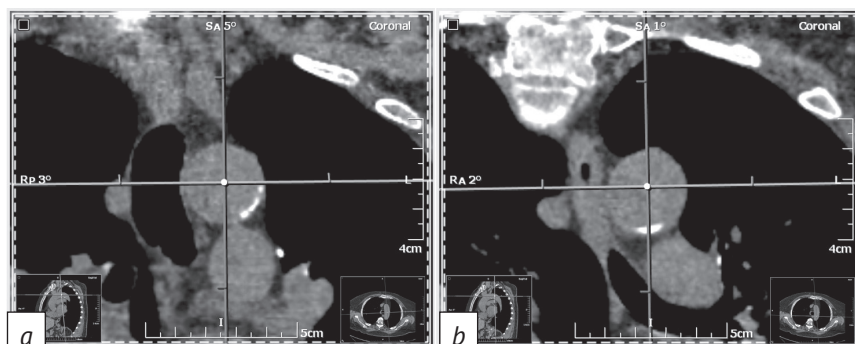


Рис. 6. Пациентка 75 лет (3-я возрастная группа). Изменения в III части дуги аорты (фрагменты компьютерной томограммы – реконструированные изображения поперечного сечения дуги аорты):

a – на уровне секторов 6–10; *b* – на уровне секторов 11–13

Fig. 6. Female patient aged 75 years (Group 3). Changes in Part III of the aortic arch (fragments of a computed tomogram – reconstructed images of the aortic arch cross-section):

a – at the level of sectors 6–10; *b* – at the level of sectors 11–13

отмечено. Статистически достоверными были различия между 1-й возрастной группой женщин при сравнении со 2-й и 3-й группами мужчин. В женских группах обнаружены различия при сравнении 1-й и 2-й возрастных групп с 3-й. Выявляемые различия между группами согласуются с факторами полового диморфизма и возрастными особенностями, оказывающими влияние на развитие атеросклеротических изменений [19]. В частности, во II и III частях дуги аорты для всех возрастных групп отмечались статистически значимые различия при сравнении данных среди женщин и мужчин. Представленные нами результаты уточняют динамику развития проявлений атеросклеротических изменений для стенки дуги аорты, дополняя описание характерных качественных изменений [1, 9] в количественном выражении.

Заключение / Conclusion

В результате проведенного исследования установлено, что атеросклеротические изменения дуги аорты наиболее часто в I части дуги аорты выявляются по верхней полуокружности (секторы 22–24). Во II части наименьшие изменения находятся в правой полуокружности (секторы 15–22). В III части дуги аорты изменения наиболее выражены в нижних отделах и слева (секторы 6–14). Расположение локальных изменений стенки дуги аорты у мужчин и женщин различается слабо.

Выявленные закономерности актуальны для разработки реконструктивных хирургических вмешательств на уровне дуги аорты и ее ветвей, а также при интерпретации результатов инструментальных исследований для оценки индивидуальных особенностей развития атеросклероза.

Литература

1. Клинические рекомендации. Рекомендации по диагностике и лечению заболеваний аорты (2017). Кардиология и сердечно-сосудистая хирургия. 2018; 11(1): 7–67.
2. Сусанин Н.В., Хафизов Т.Н., Гапонов Д.П., Чернявский М.А. Результаты эндоваскулярных и гибридных операций при патологии дуги аорты. Эндоваскулярная хирургия. 2023; 10(3): 303–9. <https://doi.org/10.24183/2409-4080-2023-10-3-303-309>.
3. Garg PK, Bhatia HS, Allen TS, et al. Assessment of subclinical atherosclerosis in asymptomatic people in vivo: measurements suitable for biomarker and mendelian randomization studies. *Arterioscler Thromb Vasc Biol*. 2024; 44(1): 24–47. <https://doi.org/10.1161/ATVBAHA.123.320138>.
4. Пантелеева Ю.К., Ванюркин А.Г., Чернова Д.В. и др. Технические аспекты эндопротезирования дуги аорты. В кн.: Ивановская И.И., Поснова М.В. (ред.) Наука и технологии – 2023: сборник статей Международного научно-исследовательского конкурса, Петрозаводск, 16 октября 2023 г. Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука»; 2023: 194–206.
5. Имаев Т.Э., Саличкин Д.В., Комлев А.Е. и др. Эндоваскулярное протезирование дуги аорты. Ангиология и сосудистая хирургия. 2021; 27(3): 34–45. <https://doi.org/10.33529/ANGIQ2021303>.
6. Халилов М.А., Мошкин А.С., Мошкина Л.В. Закономерности морфометрии магистральных артерий шеи с данными эхокардиографии. Вестник рентгенологии и радиологии. 2024; 105(5): 255–61. <https://doi.org/10.20862/0042-4676-2024-105-5-255-261>.
7. Momcilovic D, Begrich C, Stumpf MJ, et al. Preclinical atherosclerotic burden in carotid and lower extremity arteries in adults with congenital heart disease. *Vasa*. 2023; 52(4): 257–63. <https://doi.org/10.1024/0301-1526/a001073>.
8. Николенко В.Н., Мошкин А.С., Халилов М.А. и др. Оценка гемодинамических показателей на основе результатов ультразвуковой доплерографии при различных вариантах положении сосудов в области бифуркации общих сонных артерий. Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2024; 23(2): 15–23. <https://doi.org/10.24884/1682-6655-2024-23-2-15-23>.
9. Ihle-Hansen H, Vigen T, Berge T, et al. Carotid plaque score for stroke and cardiovascular risk prediction in a middle-aged cohort from the general population. *J Am Heart Assoc*. 2023; 12(17): e030739. <https://doi.org/10.1161/JAHA.123.030739>.
10. Holswilder G, Wermer MJ, Holman ER, et al. CT angiography of the heart and aorta in TIA and ischaemic stroke: cardioembolic risk sources and clinical implications. *J Stroke Cerebrovasc Dis*. 2020; 29(12): 105326. <https://doi.org/10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2020.105326>.
11. Coles-Black J, Bolton D, Chuen J. Accessing 3D printed vascular phantoms for procedural simulation. *Front Surg*. 2021; 7: 626212. <https://doi.org/10.3389/fsurg.2020.626212>.
12. Шаданов А.А., Сирота Д.А., Берген Т.А. и др. Анатомическая вариабельность строения дуги и грудного отдела аорты и ее влияние на патологические состояния аорты. Патология кровообращения и кардиохирургия. 2020; 24(4): 72–82. <https://doi.org/10.21688/1681-3472-2020-4-72-82>.
13. Memon S, Friend E, Samuel SP, et al. 3D printing of carotid artery and aortic arch anatomy: implications for preprocedural planning and carotid stenting. *J Invasive Cardiol*. 2021; 33(9): E723–9. <https://doi.org/10.25270/jic/20.00696>.
14. Салохединова Р.Р., Орлова А.А., Цыганков Ю.М. и др. Отечественные многобраншевые протезы дуги аорты из полиэфирного волокна с необходимым комплексом функциональных свойств. В кн.: Новые полимерные композиционные материалы: материалы XX международной научно-практической конференции, Нальчик, 4–10 июля 2024 г. Нальчик: Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова; 2024: 27.
15. Шаданов А.А., Сирота Д.А., Ляшенко М.М. и др. Гибридные протезы для реконструкции дуги аорты: эволюция и современное состояние. Ангиология и сосудистая хирургия. 2021; 27(2): 41–9. <https://doi.org/10.33529/ANGIO2021126>.
16. Мироненко В.А., Рычин С.В., Гарманов С.В. и др. Непосредственные результаты хирургического лечения пациентов с аневризмой и расслоением восходящей аорты по классической методике Bentall с анастомозом по Cabrol и в модификации N. Kouchoukos. Вестник Национального медико-хирургического центра им. Н.И. Пирогова. 2024; 19(3): 27–32. https://doi.org/10.25881/20728255_2024_19_3_27.
17. Болдырев С.Ю., Тютюников П.К., Абидзах С.Б. и др. Протезирование восходящего отдела и дуги аорты без циркуляторного ареста. Хирургия. Журнал им. Н.И. Пирогова. 2025; 2: 119–22. <https://doi.org/10.17116/hirurgia2025021119>.
18. Ахмедов У.У., Шарафутдинов М.Р., Якубов Р.А. и др. Полное эндопротезирование дуги аорты с применением техник фенестрации outside и in situ: первые результаты. Клиническая и экспериментальная хирургия. Журнал имени академика Б.В. Петровского. 2022; 10(4): 12–5. <https://doi.org/10.33029/2308-1198-2022-10-4-12-15>.
19. Андреева И.В., Григорьева А.С., Калинина Н.В. Тканевые биомаркеры раннего сосудистого старения. *Digital Diagnostics*. 2021; 2(2S): 8–9. <https://doi.org/10.17816/DD83173>.

References

1. Clinical Guidelines. Guidelines for the diagnosis and treatment of aortic diseases (2017). *Russian Journal of Cardiology and Cardiovascular Surgery*. 2018; 11(1): 7–67 (in Russ).
2. Susanin NV, Khafizov TN, Gaponov DP, Chernyavsky MA. Results of endovascular and hybrid operations for pathology of the aortic arch. *Endovaskulyarnaya khirurgiya / Russian Journal of Endovascular Surgery*. 2023; 10(3): 303–9 (in Russ). <https://doi.org/10.24183/2409-4080-2023-10-3-303-309>.
3. Garg PK, Bhatia HS, Allen TS, et al. Assessment of subclinical atherosclerosis in asymptomatic people in

- vivo: measurements suitable for biomarker and mendelian randomization studies. *Arterioscler Thromb Vasc Biol.* 2024; 44(1): 24–47. <https://doi.org/10.1161/ATVBAHA.123.320138>.
4. Panteleeva YuK, Vanyurkin AG, Chernova DV, et al. Technical aspects of aortic arch endoprosthetics. In: Ivanovskaya II, Posnova MV (Eds) *Science and Technology – 2023: collection of articles of the International Research Competition, Petrozavodsk, October 16, 2023. Petrozavodsk: International Center for Scientific Partnership “New Science”; 2023: 194–206 (in Russ).*
 5. Imaev TE, Salichkin DV, Komlev AE, et al. Endovascular repair of the aorti arch. *Angiology and Vascular Surgery.* 2021; 27(3): 34–45 (in Russ). <https://doi.org/10.33529/ANGIQ2021303>.
 6. Khalilov MA, Moshkin AS, Moshkina LV. Patterns of neck main arteries morphometry and echocardiography data. *Journal of Radiology and Nuclear Medicine.* 2024; 105(5): 255–61 (in Russ). <https://doi.org/10.20862/0042-4676-2024-105-5-255-261>.
 7. Momcilovic D, Begrich C, Stumpf MJ, et al. Preclinical atherosclerotic burden in carotid and lower extremity arteries in adults with congenital heart disease. *Vasa.* 2023; 52(4): 257–63. <https://doi.org/10.1024/0301-1526/a001073>.
 8. Nikolenko VN, Moshkin AS, Khalilov MA, et al. Assessment of hemodynamic parameters based on the results of ultrasound Dopplerography in different variants of the position of vessels in the area of bifurcation of the common carotid arteries. *Regional Blood Circulation and Microcirculation.* 2024; 23(2): 15–23 (in Russ). <https://doi.org/10.24884/1682-6655-2024-23-2-15-23>.
 9. Ihle-Hansen H, Vigen T, Berge T, et al. Carotid plaque score for stroke and cardiovascular risk prediction in a middle-aged cohort from the general population. *J Am Heart Assoc.* 2023; 12(17): e030739. <https://doi.org/10.1161/JAHA.123.030739>.
 10. Holswilder G, Wermer MJ, Holman ER, et al. CT angiography of the heart and aorta in TIA and ischaemic stroke: cardioembolic risk sources and clinical implications. *J Stroke Cerebrovasc Dis.* 2020; 29(12): 105326. <https://doi.org/10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2020.105326>.
 11. Coles-Black J, Bolton D, Chuen J. Accessing 3D printed vascular phantoms for procedural simulation. *Front Surg.* 2021; 7: 626212. <https://doi.org/10.3389/fsurg.2020.626212>.
 12. Shadanov A, Sirota D, Bergen T, et al. Anatomical variability in the structure of the arch and thoracic aorta and its influence on aorta related pathological conditions. *Patologiya krovoobrashcheniya i kardiokhirurgiya.* 2020; 24(4): 72–82 (in Russ). <https://doi.org/10.21688/1681-3472-2020-4-72-82>.
 13. Memon S, Friend E, Samuel SP, et al. 3D printing of carotid artery and aortic arch anatomy: implications for preprocedural planning and carotid stenting. *J Invasive Cardiol.* 2021; 33(9): E723–9. <https://doi.org/10.25270/jic/20.00696>.
 14. Salokhedina RR, Orlova AA, Tsygankov YuM, et al. Domestic multi-branch aortic arch prostheses made of polyester fiber with the necessary set of functional properties. In: *New polymer composite materials: proceedings of the XX International Scientific and Practical Conference, Nalchik, July 4–10, 2024. Nalchik: Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov; 2024: 272 (in Russ).*
 15. Shadanov AA, Sirota DA, Lyashenko MM, et al. Hybrid grafts for aortic arch reconstruction: evolution and state of the art. *Angiology and Vascular Surgery.* 2021; 27(2): 41–9 (in Russ). <https://doi.org/10.33529/ANGIO2021126>.
 16. Mironenko VA, Rychin SV, Garmanov SV, et al. Short-term results of surgical treatment of aneurysms and dissection of the ascending aorta using the classical Bentall technique with Cabrol anastomosis and modified by N. Kouchoukos. *Bulletin of Pirogov National Medical and Surgical Center.* 2024; 19(3): 27–32 (in Russ). https://doi.org/10.25881/20728255_2024_19_3_27.
 17. Boldyrev SYu, Tyutyunikov PK, Abidzakh SB, et al. Ascending aorta and aortic arch replacement without circulatory arrest. *Pirogov Russian Journal of Surgery.* 2025; 2: 119–22 (in Russ). <https://doi.org/10.17116/hirurgia2025021119>.
 18. Akhmedov UU, Sharafutdinov MR, Yakubov RA, et al. Total arch TEVAR with outside (on-a-table) and in situ fenestration (F-TEVAR): first results. *Clinical and Experimental Surgery. Petrovsky Journal.* 2022; 10(4): 12–5 (in Russ). <https://doi.org/10.33029/2308-1198-2022-10-4-12-15>.
 19. Andreeva IV, Grigorev AS, Kalina NV. Tissue biomarkers of early vascular aging. *Digital Diagnostics.* 2021; 2(2S): 8–9 (in Russ). <https://doi.org/10.17816/DD83173>.



Венозный инфаркт мозжечка в сочетании с венозной аномалией развития и тромбозом мозговых синусов с противоположной стороны

Демьянов А.П., Долгушин М.Б., Ростовцева Т.М.

ФГБУ «Федеральный центр мозга и нейротехнологий» Федерального медико-биологического агентства России, ул. Островитянова, 1, стр. 10, Москва, 117513, Российская Федерация

Демьянов Алексей Павлович, врач-рентгенолог отделения рентгенологических и радионуклидных методов диагностики ФГБУ «Федеральный центр мозга и нейротехнологий» ФМБА России; <https://orcid.org/0009-0003-1779-9234>

Долгушин Михаил Борисович, д. м. н., профессор, руководитель отдела, заведующий отделением рентгенологических и радионуклидных методов диагностики ФГБУ «Федеральный центр мозга и нейротехнологий» ФМБА России; <https://orcid.org/0000-0003-3930-5998>

Ростовцева Татьяна Михайловна, врач-рентгенолог, научный сотрудник отделения рентгенологических и радионуклидных методов диагностики ФГБУ «Федеральный центр мозга и нейротехнологий» ФМБА России; <http://orcid.org/0000-0001-6541-179X>

Резюме

Венозные аномалии развития (ВАР) головного мозга относятся к наиболее часто встречающимся порокам развития сосудов, на их долю приходится около 55% всех сосудистых аномалий головного мозга. Большинство из них протекают бессимптомно и не требуют лечения. Осложнения при ВАР встречаются редко. В литературе описаны случаи кровоизлияний, венозной конгестии, эпилепсии, ассоциированных с ВАР, однако чаще всего осложнения обусловлены другими пороками развития, такими как кавернозные и лимфатические мальформации, фокальные кортикальные дисплазии. В статье представлено редкое клиническое наблюдение инфратенториального венозного инфаркта, возникшего в результате тромбоза ВАР, в свою очередь, спровоцированного тромбозом контралатерально расположенных сигмовидного и поперечного венозных синусов.

Ключевые слова: венозный инфаркт; венозная аномалия развития; сосудистая аномалия головного мозга; церебральный венозный тромбоз.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Демьянов А.П., Долгушин М.Б., Ростовцева Т.М. Венозный инфаркт мозжечка в сочетании с венозной аномалией развития и тромбозом мозговых синусов с противоположной стороны. *Вестник рентгенологии и радиологии*. 2024; 105(6): 307–313. <https://doi.org/10.20862/0042-4676-2024-105-6-307-313>

Для корреспонденции: Демьянов Алексей Павлович, E-mail: aleksejpd@gmail.com

Статья поступила 24.02.2025

После доработки 07.04.2025

Принята к печати 08.04.2025

Cerebellar Venous Infarction Combined with Developmental Venous Anomaly and Contralateral Sinus Thrombosis

Aleksej P. Demyanov, Mikhail B. Dolgushin, Tatiana M. Rostovtseva

Federal Center of Brain Research and Neurotechnologies, ul. Ostrovityanova, 1, str. 10, Moscow, 117513, Russian Federation

Aleksej P. Demyanov, Radiologist, Department of X-ray and Radionuclide Diagnostic Methods, Federal Center of Brain Research and Neurotechnologies; <https://orcid.org/0009-0003-1779-9234>

Mikhail B. Dolgushin, Dr. Med. Sc., Professor, Head of Department of X-ray and Radionuclide Diagnostic Methods, Federal Center of Brain Research and Neurotechnologies; <https://orcid.org/0000-0003-3930-5998>

Tatiana M. Rostovtseva, Radiologist, Researcher, Department of X-ray and Radionuclide Diagnostic Methods, Federal Center of Brain Research and Neurotechnologies;
<https://orcid.org/0000-0001-6541-179X>

Abstract

Developmental venous anomalies (DVA) are among the most common malformations, accounting for about 55% of all cerebral vascular anomalies. Most of them are asymptomatic, detected incidentally by brain magnetic resonance imaging and do not require treatment. Complications in DVA are rare. Cases of DVA-associated hemorrhage, venous congestion, and epilepsy have been described in literature; however, most cases of complications are due to other malformations, such as cavernous and lymphatic malformations, focal cortical dysplasias. We present a rare clinical case of infratentorial venous infarction resulting from DVA thrombosis, which was triggered by thrombosis in contralateral sigmoid and transverse venous sinuses. **Keywords:** venous infarction; developmental venous anomaly; cerebral vascular anomaly; cerebral venous thrombosis.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

For citation: Demyanov AP, Dolgushin MB, Rostovtseva TM. Cerebellar venous infarction combined with developmental venous anomaly and contralateral sinus thrombosis. *Journal of Radiology and Nuclear Medicine*. 2024; 105(6): 307–313 (in Russian). <https://doi.org/10.20862/0042-4676-2024-105-6-307-313>

For corresponding: Aleksey P. Demyanov, E-mail: aleksejpd@gmail.com

Received February 24, 2025

Revised April 7, 2025

Accepted April 8, 2025

Введение / Introduction

Венозные аномалии развития (ВАР) головного мозга, ранее известные как церебральные венозные ангиомы, представляют собой экстремальный вариант строения транскеребральной венозной системы, дренирующей паренхиму головного мозга. Такие аномалии обычно являются случайной находкой, в абсолютном большинстве случаев (около 97%) они не имеют клинического значения и не требуют лечения [1–3].

На всех импульсных последовательностях ВАР могут визуализироваться как линейные участки пониженной интенсивности магнитно-резонансного сигнала, более отчетливо они видны на постконтрастных T1-взвешенных изображениях (ВИ), а наиболее чувствительными в отношении ВАР и часто сочетающихся с ними кавернозных мальформаций являются импульсные последовательности, взвешенные по магнитной восприимчивости, которые позволяют отчетливо определить сосудистые структуры с медленным током крови. В ряде случаев в окружающей паренхиме вещества мозга могут быть выявлены участки глиоза, отека или лейкоареоза, по-видимому, возникающие в результате венозной конгестии [3–5].

ВАР крайне редко сопровождаются осложнениями: частота встречаемости венозных инфарктов и кровоизлияний, обусловленных тромбозом ВАР, составляет около 0,15% [4, 5]. В литературе описаны единичные случаи венозных инфарктов, сформировавшихся в результате тромбоза ВАР.

Представляем редкое клиническое наблюдение: инфратенториальный венозный инфаркт, сформировавшийся в результате тромбоза коллекторной вены ВАР, дренирующей в тромбированный контралатеральный сигмовидный синус.

В работе описаны диагностические возможности и рассмотрены особенности клинической картины и методов визуализации, которые позволяют выявить данный тип патологии.

Описание случая / Case report

В ФГБУ «Федеральный центр мозга и нейротехнологий» ФМБА России обратилась женщина в возрасте 41 год с жалобами на сильные головокружения, нарушения речи и мелкой моторики, сохраняющиеся в течение 2 нед. При неврологическом осмотре выявлены нарушения вестибулярной функции, синдром позиционного головокружения, вестибулоатактический синдром, а также позиционный нистагм. Лечащим врачом выставлен диагноз, классифицируемый по Международной классификации болезней 10-го пересмотра как I64 «Инсульт, не уточненный как кровоизлияние или инфаркт».

В рамках обследования пациентке проведена **магнитно-резонансная томография (МРТ)** головного мозга с внутривенным введением 1 ммоль/мл контрастного препарата Гадовист® (Bayer, Германия) на магнитном резонансном томографе Discovery MR750w 3.0T (GE Healthcare, США) при помощи 32-канальной катушки HNU (head and neck unit). Протокол сканирования включал импульсные последовательности T1- и T2-ВИ, FLAIR и SWAN, диффузионно-взвешенные изображения (ДВИ) с построением карт измеряемого коэффициента диффузии (ИКД), а также бесконтрастную времяпролетную МР-ангиографию и фазоконтрастную МР-венографию. Постконтрастные серии T1-FSPGR и T1-Cube были выполнены в раннюю и отсроченную фазы контрастного усиления.

При анализе данных МРТ в правом зубчатом ядре с переходом на базальные отделы червя моз-

жечка на ДВИ/ИКД обнаружена зона вазогенного отека, на фоне которой определялся участок умеренно выраженного цитотоксического отека с признаками раннего петехиального геморрагического пропитывания, а по периферии – накопление контрастного вещества. По данным времяпролетной МР-ангиографии признаков нарушения проходимости и стенозирования интракраниальных артерий не выявлено (рис. 1). Указанные изменения, особенно наличие выраженного вазогенного отека и раннего геморрагического петехиального пропитывания, позволяют предположить венозную природу данного события.

Анализ фазоконтрастной МР-венографии показал отсутствие МР-сигнала от кровотока по по-

перечному и сигмовидному венозным синусам слева. Отмечено отсутствие феномена пустоты потока в области левых поперечного и сигмовидного венозных синусов на Т2-ВИ, в просвете синусов визуализированы тромботические массы, накапливающие контрастное вещество (рис. 2, 3).

В черве мозжечка и левом зубчатом ядре выявлена тромбированная ВАР с венозным коллектором, расположенным вдоль нижнего края левой средней ножки мозжечка и дренирующимся в тромбированный левый сигмовидный синус (рис. 4).

Отличительной особенностью церебрального венозного инфаркта является раннее присутствие вазогенного отека, который можно дифференци-

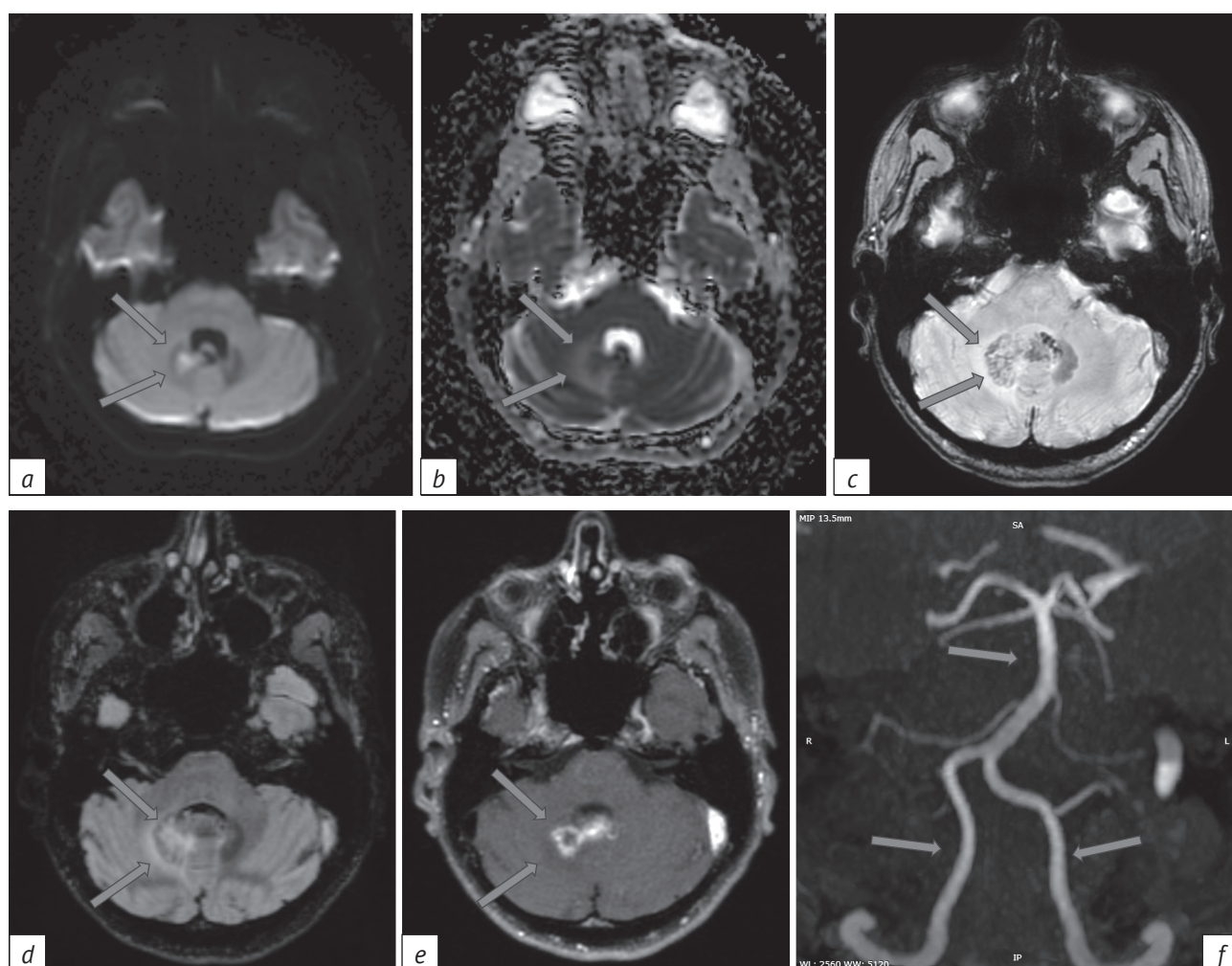


Рис. 1. Подострый венозный инфаркт в черве мозжечка и правом зубчатом ядре:

a, b – зона цитотоксического отека в правом зубчатом ядре и черве мозжечка (ДВИ и ИКД-карта); *c* – петехиальные кровоизлияния в правом зубчатом ядре (SWAN); *d* – зона вазогенного отека в белом веществе правой гемисферы мозжечка (FLAIR); *e* – после введения контрастного вещества его накопление по периферии зоны цитотоксического отека (T1-Cube); *f* – неизмененные позвоночные и основная артерии (времяпролетная МР-ангиография)

Fig. 1. Subacute venous infarction in the cerebellar vermis and right dentate nucleus:

a, b – area of cytotoxic edema in the right dentate nucleus and cerebellar vermis (DWI and ADC map); *c* – petechial hemorrhages in the right dentate nucleus (SWAN); *d* – zone of vasogenic edema in white matter of the right cerebellar hemisphere (FLAIR); *e* – after contrast agent injection, it is accumulated at the periphery of cytotoxic edema zone (T1-Cube); *f* – unchanged vertebral and main arteries (time-of-flight MR angiography)

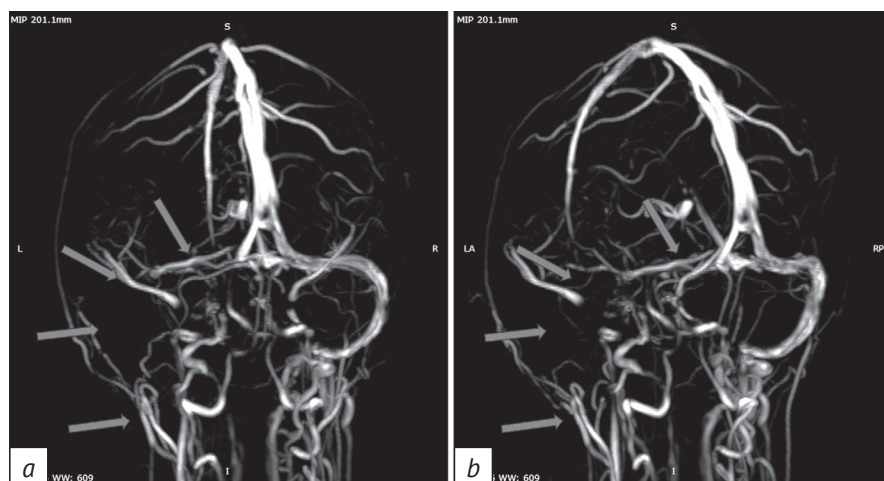


Рис. 2. Бесконтрастная вазоконтрастная МР-венография в 3D-реконструкции (а, б). Стрелками указано отсутствие МР-сигнала от потока крови по левым поперечному и сигмовидному синусам

Fig. 2. Contrast-free vasocontrast MR venography in 3D reconstructions (a, b). Arrows indicate the absence of MR signal from blood flow along the left transverse and sigmoid sinuses

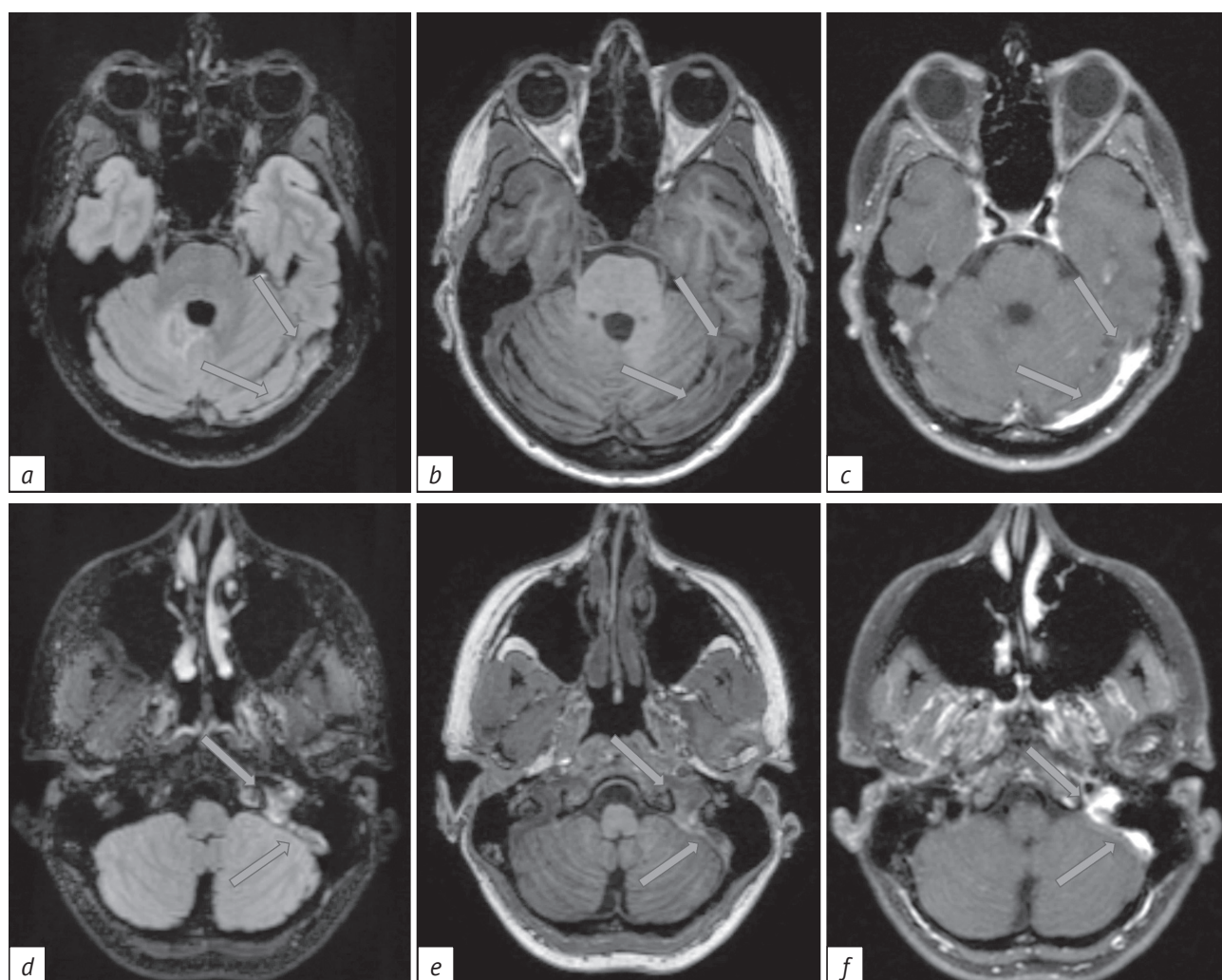


Рис. 3. Тромбированные левые поперечный (а–с) и сигмовидный (d–f) синусы. Стрелками указаны неоднородное повышение интенсивности МР-сигнала от тромбированных левых поперечного и сигмовидного синусов на T2-FLAIR (а, d), неоднородное повышение интенсивности МР-сигнала от тромбированных левых поперечного и сигмовидного синусов на T1-FSPGR до введения контрастного вещества (b, e), типичное накопление контрастного препарата эволюционирующим тромбом на T1-Cube после введения контрастного вещества (c, f)

Fig. 3. Thrombosed left transverse (a–c) and sigmoid (d–f) sinuses. Arrows indicate heterogeneous hyperintense signal from the thrombosed left transverse and sigmoid sinuses on T2-FLAIR (a, d); heterogeneous hyperintense signal from the thrombosed left transverse and sigmoid sinuses on T1-FSPGR before contrast agent injection (b, e); typical accumulation of contrast agent by evolving thrombus on T1-Cube after contrast agent injection (c, f)

ровать от цитотоксического с помощью диффузионной МРТ. Он характеризуется гипо- или изоинтенсивными очагами на ДВИ/ИКД, повышением интенсивности сигнала и коэффициента ИКД [6]. Помимо этого, венозный инфаркт чаще осложняется ранней геморрагической трансформацией, также косвенным признаком может считаться отсутствие поражений в артериях соответствующих бассейнов.

Обсуждение / Discussion

ВАР представляют собой расширенные медуллярные вены, сближающиеся между собой и дренирующиеся центрипетально или радиально в транскеребральный венозный коллектор и далее в поверхностные или пиальные вены мозга. В зависимости от типа дренирования их разделяют на поверхностные и глубокие. В ВАР отсутствуют прямые артериовенозные шунты, а структура вещества мозга между венозными сосудами в большинстве случаев сохраняется неизменной. Они не обладают пролиферативным потенциалом, в связи с чем ранее широко распространенный термин «венозная ангиома» более не рекомендуется к употреблению [1, 2].

Этиология и механизм развития ВАР не установлены. В настоящее время наибольшее распространение получила гипотеза, в соответствии с которой их возникновение является компенсаторным механизмом системы венозного дренажа при аномальном развитии или внутриутробной окклюзии капилляров либо мелких транскеребральных венозных сосудов [2, 3]. Частота выявления

ВАР при МРТ составляет около 1% в возрастной группе до 1 года и достигает 9% в старшем школьном возрасте и у взрослых. Это также позволяет предположить, что причиной их появления может являться изменение венозной архитектоники и венозного дренажа в постнатальном периоде [3, 4]. Таким образом, ВАР могут являться доминантным средством венозного дренажа в определенном участке мозговой ткани и должны быть расценены как функционально стабильный вариант развития венозной системы [3–5]. Гистологически ВАР представляют собой вены с утолщенной гиалинизированной стенкой, со сниженным содержанием мышечных клеток или эластичной соединительной ткани, что в условиях медленного тока крови является дополнительным фактором риска образования тромбов [3–5, 7].

Изолированно встречающиеся ВАР в большинстве случаев протекают бессимптомно и не требуют лечения. В редких случаях они могут служить причиной нарушения проводимости Sylvian водопровода с развитием гидроцефалии, а также нейроваскулярной компрессии с возникновением лицевого гемиспазма и шума в ушах. В то же время ВАР нередко сочетаются с кавернозными мальформациями, фокальными кортикальными дисплазиями или лимфатическими мальформациями, которые, в свою очередь, могут сопровождаться кровоизлияниями, эпилептическими приступами, головной болью [1].

ВАР в большинстве случаев обнаруживаются случайно при мультиспиральной компьютерной томографии (МСКТ) и МРТ головного мозга. Они

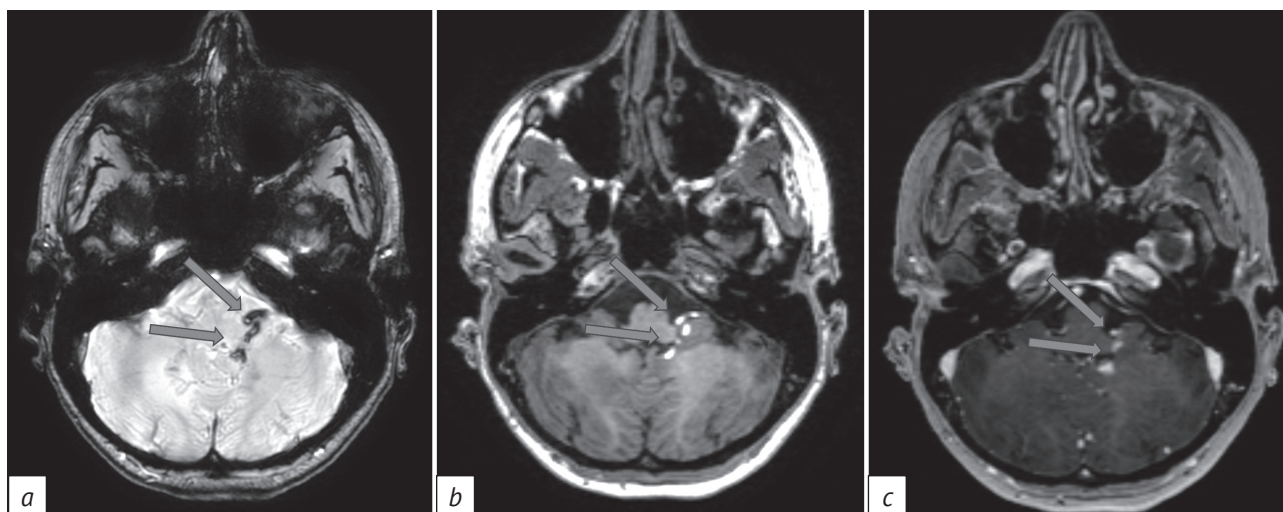


Рис. 4. Тромбированная венозная аномалия развития:

a – гипointенсивный МР-сигнал (SWAN); *b* – гиперинтенсивный МР-сигнал до введения контрастного вещества (T1-FSPGR); *c* – после введения контрастного вещества его накопление тромботическими массами в структуре венозной аномалии развития (T1-Cube)

Fig. 4. Thrombosed developmental venous anomaly:

a – hypointense MR-signal (SWAN); *b* – before contrast agent injection, there is hyperintense MR-signal (T1-FSPGR); *c* – after contrast agent injection, it is enhanced by thrombotic masses of the developmental venous anomaly (T1-Cube)

имеют характерный вид и наиболее четко визуализируются на изображениях, взвешенных по магнитной восприимчивости, а также на T1-ВИ или МСКТ. Как правило, в паренхиме мозга определяется центральный венозный коллектор с периферическими афферентными мелкими венами, демонстрирующий симптом «головы медузы».

Церебральный венозный тромбоз, включающий тромбоз венозного синуса, кортикальных или глубоких вен либо сочетание этих процессов, – редкая патология, на долю которой приходится около 0,5% всех сердечно-сосудистых заболеваний [8–12]. Она может проявляться широким спектром неспецифических неврологических симптомов, таких как головная боль, головокружение, фокальный неврологический дефицит или эпилептические приступы, что нередко затрудняет диагностику [12, 13]. Патогенез церебрального венозного тромбоза до конца не изучен, однако подавляющее большинство пациентов имеют один и более факторов риска: гормональные, ятрогенные, включая прием стероидов и оральных контрацептивов, заболевания крови с предрасположенностью к образованию тромбов, системные патологии, в т.ч. сепсис и дегидратация, а также некоторые другие [13].

Тромбоз венозного синуса приводит к резкому снижению кровотока с его перераспределением по сети венозных коллатералей, в значительной мере способных компенсировать нарушение циркуляции на ранних стадиях. В дальнейшем повышение венозного давления может привести к расширению вен и капиллярной сети, развитию интерстициального отека, увеличению продукции ликвора на фоне снижения его абсорбции и последующим разрывам венозных структур с формированием кровоизлияния [12–14].

Венозный инфаркт является редкой формой инсульта и наиболее часто возникает вследствие тромбоза церебральных вен или синусов. При МСКТ и МРТ головного мозга основными отличиями венозного инфаркта от артериального являются [15–20]:

- несоответствие локализации типичному артериальному бассейну;
- близость расположения к тромбированному синусу или вене;
- типичная локализация в парасагиттальных, темпоропариетальных или глубоких отделах мозга;
- поражение белого вещества при сохраненных кортикальных отделах вещества мозга;
- наличие в структуре инфаркта кровоизлияний с тенденцией к распространению от центра к периферии.

Важным компонентом правильной постановки диагноза венозного инфаркта является правильное понимание особенностей венозного оттока

в области пораженных структур мозга. Сосудистое сплетение IV желудочка представляет собой разветвленную сеть мелких сосудов, как правило, состоящую из двух симметричных частей, расположенных в крыше желудочка и пролабирующих через отверстия Люшка и Мажанди, в складках мягкой мозговой оболочки, которые образуют хориоидею [11, 15, 19, 21] (рис. 5). Основными афферентами сосудистого сплетения IV желудочка являются верхние, передние и задние нижние мозжечковые артерии, магистральный венозный отток в норме осуществляется посредством вены латерального кармана IV желудочка в каменистую вену и каменистый синус (см. рис. 2–3).

ВАР крайне редко сопровождаются появлением таких осложнений, как тромбоз коллекторной вены с развитием венозного инфаркта. В представленном клиническом случае произошло тромбирование левых поперечного и сигмовидного венозных синусов, которое не привело к формированию венозного инфаркта в прилежащей к тромбированным синусам мозговой ткани, но спровоцировало венозный застой и последующий тромбоз коллекторной вены ВАР, что вызвало формирование венозного инфаркта в черве и контралатеральном зубчатом ядре мозжечка. Следует отметить различия сигнальных характеристик тромботических масс в венозных синусах и ВАР: в составе последней отмечались МР-признаки наличия метгемоглобина, что косвенно может свидетельствовать о более позднем формировании тромботических масс [22].

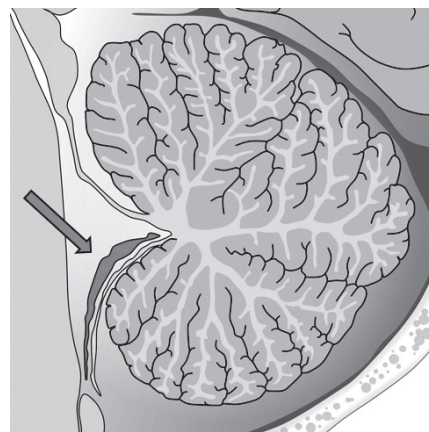


Рис. 5. Схематичное изображение сосудистого сплетения IV желудочка – значительно васкуляризированная структура по базально-дорсальной стенке желудочка, которая локализуется в складках мягкой мозговой оболочки, образующих хориоидею (подготовлено авторами по данным [15, 19])

Fig. 5. Schematic representation of the IV ventricular vascular plexus: a significantly vascularized structure along the basal dorsal vascular wall, localized in the folds of soft dura mater, forming the chorioidea (prepared by the authors using data from [15, 19])

Закключение / Conclusion

Представлено редкое клиническое наблюдение, которое в сумме всех факторов, вероятно, соответствует инфратенториальному венозному инфаркту, возникшему в результате тромбоза ВАР, в свою очередь, спровоцированного тромбозом контралатерально расположенных сигмовидного и поперечного венозных синусов. Интерпретация данных нейровизуализации с учетом особенностей венозного оттока структур задней черепной ямки и потенциальных патоморфологических механизмов необходима для своевременной постановки диагноза и эффективности терапии, в особенности у пациентов с неспецифической неврологической симптоматикой.

Лечение при тромбозе венозного синуса и венозном инфаркте проводится одинаково и начинается с ранней антикоагуляции. Наличие геморрагического пропитывания не является проти-

вопоказанием к антикоагуляции, но данный вопрос должен рассматривать и решать в каждом конкретном случае наблюдающий невролог.

Для диагностики такой патологии «золотым стандартом» помимо МРТ служит проведение компьютерной томографии с визуализацией артерий и вен, а также дальнейший контроль динамики на фоне лечения. В последние десятилетия МРТ зарекомендовала себя как один из наиболее информативных и точных методов визуализации, позволяющий выявлять ранние маркеры сосудистых заболеваний и прогнозировать их дальнейшее развитие. Использование МРТ для оценки прогностических факторов в системе доказательной медицины – важный инструмент для улучшения качества медицинской помощи, а также для создания персонализированных планов лечения, основанных на объективных и доказанных данных.

Литература [References]

1. Truwit C. Venous angioma of the brain: history, significance, and imaging findings. *AJR Am J Roentgenol*. 1992; 159(6): 1299–307. <https://doi.org/10.2214/ajr.159.6.1442406>.
2. Pereira VM, Geibprasert S, Krings T, et al. Pathomechanisms of symptomatic developmental venous anomalies. *Stroke*. 2008; 39(12): 3201–15. <https://doi.org/10.1161/strokeaha.108.521799>.
3. Peltier J, Toussaint P, Desenclos C, et al. Cerebral venous angioma of the pons complicated by nonhemorrhagic infarction: case report. *J Neurosurg*. 2004; 101: 690–3. <https://doi.org/10.3171/jns.2004.101.4.0690>.
4. Lasjaunias P, Burrows P, Planet C. Developmental venous anomalies (DVA): the so-called venous angioma. *Neurosurg Rev*. 1986; 9(3): 233–42. <https://doi.org/10.1007/BF01743138>.
5. Töpper R, Jürgens E, Reul J, Armin T. Clinical significance of intracranial developmental venous anomalies. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*. 1999; 67: 234–8. <https://doi.org/10.1136/jnnp.67.2.234>.
6. Семенов С.Е. Аспекты лучевой диагностики раннего вазогенного отека в зонах гиперперфузии венозного ишемического инсульта. *Сибирский журнал клинической и экспериментальной медицины*. 2022; 37(1): 47–56. <https://doi.org/10.29001/2073-8552-2022-37-1-47-56>. [Semenov SE. Imaging of early vasogenic edema in hyperperfusion zones of venous ischemic stroke. *The Siberian Journal of Clinical and Experimental Medicine*. 2022; 37(1): 47–56 (in Russ). <https://doi.org/10.29001/2073-8552-2022-37-1-47-56>.]
7. Brinjikji W, El-Rida El-Masri A, Wald JT, Lanzino G. Prevalence of developmental venous anomalies increases with age. *Stroke*. 2017; 48(7): 1997–9. <https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.116.016145>.
8. Aoki R, Srivatanakul K. Developmental venous anomaly: benign or not benign. *Neurol Med Chir (Tokyo)*. 2016; 56(9): 534–43. <https://doi.org/10.2176/nmc.ra.2016-0030>.
9. Kiroglu Y, Oran I, Dalbasti T, et al. Thrombosis of a drainage vein in developmental venous anomaly (DVA) leading venous infarction: a case report and review of the literature. *J Neuroimaging*. 2011; 21(2): 197–201. <https://doi.org/10.1111/j.1552-6569.2009.00399.x>.
10. McCormick WF. The pathology of vascular ("arteriovenous") malformations. *J Neurosurg*. 1966; 24(4): 807–16. <https://doi.org/10.3171/jns.1966.24.4.0807>.
11. Lee C, Pennington MA, Kenney CM 3rd. MR evaluation of developmental venous anomalies: medullary venous anatomy of venous angiomas. *AJNR Am J Neuroradiol*. 1996; 17(1): 61–70.
12. Schaller B, Graf R. Cerebral venous infarction: the pathophysiological concept. *Cerebrovasc Dis*. 2004; 18(3): 179–88. <https://doi.org/10.1159/000079939>.
13. Ferro JM, Canhão P, Stam J, et al. ISCVT Investigators. Prognosis of cerebral vein and dural sinus thrombosis: results of the International Study on Cerebral Vein and Dural Sinus Thrombosis (ISCVT). *Stroke*. 2004; 35(3): 664–70. <https://doi.org/10.1161/01.STR.0000117571.76197.26>.
14. Sharifi M, Ciołkowski M, Krajewski P, Ciszek B. The choroid plexus of the fourth ventricle and its arteries. *Folia Morphol (Warsz)*. 2005; 64(3): 194–8.
15. Kim P, Castellani R, Tresser N. Cerebral venous malformation complicated by spontaneous thrombosis. *Child's Nerv Syst*. 1996; 12: 172–5. <https://doi.org/10.1007/BF00266825>.
16. Favrole P, Guichard JP, Crassard I, et al. Diffusion-weighted imaging of intravascular clots in cerebral venous thrombosis. *Stroke*. 2004; 35: 99–103. <https://doi.org/10.1161/01.STR.0000106483.41458.AF>.
17. Masson C, Godefroy O, Leclerc X, et al. Cerebral venous infarction following thrombosis of the draining vein of a venous angioma (developmental abnormality). *Cerebrovasc Dis*. 2000; 10: 235–8. <https://doi.org/10.1159/000016062>.
18. Milano JB, Arruda WO, Nikosky JG, et al. Cerebral and systemic venous thrombosis associated to prothrombin G20210 mutation: case report. *Arq Neuropsiquiatr*. 2003; 61: 1042–4. <https://doi.org/10.1590/S0004-282X2003000600031>.
19. Okpe O, Grujić R. Fourth ventricle. Available at: <https://www.kenhub.com/en/library/anatomy/the-fourth-ventricle> (accessed 05.08.2024).
17. Canedo-Antelo M, Baleato-González S, Mosqueira AJ, et al. Radiologic clues to cerebral venous thrombosis. *Radiographics*. 2019; 39(6): 1611–28. <https://doi.org/10.1148/rg.2019190015>.
20. Selim M, Fink J, Linfante I, et al. Diagnosis of cerebral venous thrombosis with echo-planar T2*-weighted magnetic resonance imaging. *Arch Neurol*. 2002; 59: 1021–6. <https://doi.org/10.1001/archneur.59.6.1021>.
22. Tubbs RS, Shoja MM, Aggarwal A, et al. Choroid plexus of the fourth ventricle: review and anatomic study highlighting anatomical variations. *J Clin Neurosci*. 2016; 26: 79–83. <https://doi.org/10.1016/j.jocn.2015.10.006>.



Левамизол-индуцированная лейкоэнцефалопатия: редкий случай побочного действия препарата

Ельшибаева Э.С.^{1,2}, Суйгенбаева А.Ж.¹, Мергалимова А.Б.¹, Оспанова Ж.Б.¹

1 РГП «Больница Медицинского центра Управления делами Президента Республики Казахстан» на ПХВ, пр-т Мангилик Ел, 80, Астана, 010000, Республика Казахстан

2 НАО «Медицинский университет Астана», ул. Бейбитшилик, 49/А, Астана, 010000, Республика Казахстан

Ельшибаева Эльмира Сериккалиевна, PhD, заведующая отделением компьютерной томографии и магнитно-резонансной томографии РГП «Больница Медицинского центра Управления делами Президента Республики Казахстан» на ПХВ; доцент Научно-исследовательского института радиологии им. академика Ж.Х. Хамзабаева НАО «Медицинский университет Астана»; <https://orcid.org/0000-0001-6264-1880>

Суйгенбаева Айгерим Жорабековна, врач радиолог РГП «Больница Медицинского центра Управления делами Президента Республики Казахстан» на ПХВ; <https://orcid.org/0009-0000-4877-3625>

Мергалимова Акерке Бакытбеккызы, врач резидент – радиолог РГП «Больница Медицинского центра Управления делами Президента Республики Казахстан» на ПХВ; <http://orcid.org/0009-0008-2488-5911>

Оспанова Жанар Бахытжановна, врач невролог РГП «Больница Медицинского центра Управления делами Президента Республики Казахстан» на ПХВ; <http://orcid.org/0009-0002-5017-1484>

Резюме

Левамизол – противопаразитарное лекарственное средство, широко используемое в клинической практике. Одним из редких побочных действий препарата является развитие левамизол-индуцированной мультифокальной воспалительной лейкоэнцефалопатии, которая прогрессирует через 2–8 нед после лечения и характеризуется демиелинизацией головного мозга и поражением белого вещества. В статье описан случай левамизол-индуцированной лейкоэнцефалопатии, которую необходимо дифференцировать с рассеянным склерозом, острым рассеянным энцефаломиелитом и оптиконеуритом.

Ключевые слова: левамизол; левамизол-индуцированная лейкоэнцефалопатия; левамизол-индуцированная мультифокальная воспалительная лейкоэнцефалопатия.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Авторы выражают благодарность сотрудникам отделения компьютерной томографии и магнитно-резонансной томографии РГП «Больница Медицинского центра Управления делами Президента Республики Казахстан» на ПХВ, а также редакции журнала за возможность опубликовать результаты своей работы.

Для цитирования: Ельшибаева Э.С., Суйгенбаева А.Ж., Мергалимова А.Б., Оспанова Ж.Б. Левамизол-индуцированная лейкоэнцефалопатия: редкий случай побочного действия препарата. Вестник рентгенологии и радиологии. 2024; 105(6): 314–324. <https://doi.org/10.20862/0042-4676-2024-105-6-314-324>

Для корреспонденции: Ельшибаева Эльмира Сериккалиевна, e-mail: elmiraelsibaeva@gmail.com

Статья поступила 07.05.2025

После доработки 16.06.2025

Принята к печати 17.06.2025

Levamisole-induced leukoencephalopathy: a rare drug side effect

Elmira S. Yelshibayeva^{1,2}, Aigerim Zh. Suigenbayeva¹, Akerke B. Mergalimova¹, Zhanar B. Ospanova¹

¹ Medical Center Hospital of the President's Affairs Administration of the Republic of Kazakhstan, prospekt Mangilik El, 80, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan

² Astana Medical University, ul. Beibytshilik, 49/A, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan

Elmira S. Yelshibayeva, PhD, Head of the Department of Computed Tomography and Magnetic Resonance Imaging, Medical Center Hospital of the President's Affairs Administration of the Republic of Kazakhstan; Associate Professor, Khamzabaev Research Institute of Radiology, Astana Medical University; <https://orcid.org/0000-0001-6264-1880>

Aigerim Zh. Suigenbayeva, Radiologist, Medical Center Hospital of the President's Affairs Administration of the Republic of Kazakhstan; <https://orcid.org/0009-0000-4877-3625>

Akerke B. Mergalimova, Resident Radiologist, Medical Center Hospital of the President's Affairs Administration of the Republic of Kazakhstan; <http://orcid.org/0009-0008-2488-5911>

Zhanar B. Ospanova, Neurologist, Medical Center Hospital of the President's Affairs Administration of the Republic of Kazakhstan; <http://orcid.org/0009-0002-5017-1484>

Abstract

Levamisole is an antihelminthic drug that is widely used in clinical practice. One of its rare side effects is the development of levamisole-associated multifocal inflammatory leukoencephalopathy, which progresses 2–8 weeks after treatment and is characterized by brain demyelination and white matter damage. The article describes a case of levamisole-induced leukoencephalopathy, which should be differentiated from multiple sclerosis, acute disseminated encephalomyelitis, and neuromyelitis optica.

Keywords: levamisole; levamisole-induced leukoencephalopathy; levamisole-associated multifocal inflammatory leukoencephalopathy.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgments. The authors express their gratitude to the staff of Department of Computed Tomography and Magnetic Resonance Imaging, Medical Center Hospital of the President's Affairs Administration of the Republic of Kazakhstan, as well as to the editors of the journal for the opportunity to publish the results of their work.

For citation: Yelshibayeva ES, Suigenbayeva AZh, Mergalimova AB, Ospanova ZhB. Levamisole-induced leukoencephalopathy: a rare drug side effect. *Journal of Radiology and Nuclear Medicine*. 2024; 105(6): 314–324 (in Russian). <https://doi.org/10.20862/0042-4676-2024-105-6-314-324>

For corresponding: Elmira S. Yelshibayeva, e-mail: elmiraelsibaeva@gmail.com

Received May 7, 2025

Revised June 16, 2025

Accepted June 17, 2025

Введение / Introduction

Левамизол был изобретен в 1966 г. в Бельгии компанией Janssen Pharmaceuticals и зарегистрирован как лекарственное средство в 1969 г. [1–3]. Он активно применялся в качестве противопаразитарного препарата для людей и животных, а в 1991 г. был одобрен и как вспомогательное средство при химиотерапии колоректального рака с 5-фторурацилом [4, 5].

Несмотря на ограниченное одобрение Управлением по контролю качества пищевых продуктов и лекарственных средств США (U.S. Food and Drug Administration, FDA), левамизол также использовался в виде иммуномодулятора при лечении ревматоидного артрита, синдрома приобретенного иммунного дефицита, язвенного колита, нефротического синдрома у детей [6, 7]. Однако его эффективность при онкологических и аутоиммунных заболеваниях оказалась низкой, а переносимость – плохой. Вопреки тому, что левамизол входит в 21-й список основных лекарств Всемирной организации здравоохранения (2019 г.), США и Европа решили отозвать его регистрационное удостоверение в 2004 и 1998 гг. соответственно и регулировать его применение (временное разрешение) при определенных показаниях, таких как нефротический синдром,

или в качестве вспомогательного средства при лечении рака [8, 9].

После запрета препарата большая часть описанных наблюдений связана с употреблением контаминированного кокаина, поскольку препарат используется как добавка к кокаину с целью утяжеления и усиления эффекта наркотика и обнаруживается в 80% случаев в его образцах, распространяемых по всему миру [7, 10–13]. Однако патология также может развиваться у пациентов, длительно принимавших левамизол по медицинским показаниям, например при лечении аутоиммунных заболеваний, паразитозов и т.п. [14].

В России левамизол входит в перечень жизненно необходимых и важнейших лекарственных препаратов¹, а в Казахстане он включен в Казахстанский национальный формуляр лекарственных

¹ Распоряжение Правительства Российской Федерации от 12 октября 2019 г. № 2406-р «Об утверждении перечня жизненно необходимых и важнейших лекарственных препаратов, а также перечней лекарственных препаратов для медицинского применения и минимального ассортимента лекарственных препаратов, необходимых для оказания медицинской помощи».

средств и зарегистрирован как противопаразитарный препарат². Механизм его действия заключается в специфическом ингибировании сукцинатдегидрогеназы, вызывающем блокирование важнейшей для нематод реакции восстановления фумарата и нарушение течения биоэнергетических процессов у гельминтов.

Одним из редких побочных действий левамизола является развитие левамизол-индуцированной мультифокальной воспалительной лейкоэнцефалопатии, которая прогрессирует в течение 2–8 нед после применения препарата, хотя описаны случаи, когда клинические симптомы возникали и через 1 день, и через месяцы (по некоторым литературным данным, до 5 мес) после использования левамизола [15–20]. Нейротоксические эффекты препарата могут проявляться независимо от дозы, даже после однократного применения 50 мг, и это указывает на то, что его токсическое действие является проявлением идиосинкразии. Такое состояние характеризуется развитием двигательных и чувствительных нарушений, атаксии, речевых, когнитивно-мнестических расстройств, спутанности сознания, нарушения контроля функции тазовых органов и т.д. [20]. Симптомы лейкоэнцефалопатии, вызванные левамизолом, в отличие от нейтропении и агранулоцитоза, не исчезают полностью после прекращения воздействия препарата [21, 22].

В большинстве наблюдений энцефалопатия является обратимой и раннее начало лечения приводит к улучшению состояния, однако зарегистрированы случаи, когда левамизол-индуцированная лейкоэнцефалопатия приводила к летальному исходу [23].

Первые описания левамизол-индуцированной лейкоэнцефалопатии представлены С. Hook et al. (1992 г.) у 3 пациентов, получавших терапию с применением фторурацила и левамизола по поводу аденокарциномы толстого кишечника [15]. Тогда авторы впервые сделали вывод о том, что причиной лейкоэнцефалопатии мог стать левамизол. В 1995 г. R. Zheng сообщил о развитии энцефалитического синдрома у 5 человек среди 10 911, массово принимавших левамизол в качестве антипаразитарного средства [24].

Патогенез развития лейкоэнцефалопатии до конца не изучен. Чтобы оценить влияние левамизола на миелин, в 1997 г. был проведен эксперимент на мышах, включавший две группы животных: здоровых и инфицированных вирусом

Тейлора (Theiler's murine encephalomyelitis virus, TMEV), известным как модель для изучения хронических воспалительных и демиелинизирующих заболеваний центральной нервной системы, таких как рассеянный склероз (РС) [25]. Левамизол вводили в обеих группах мышей и наблюдали за его потенциальными эффектами на миелин и нейровоспаление. Для оценки результатов исследователи проводили гистологический анализ мозговой ткани, чтобы определить степень повреждения миелина и признаки воспаления, также оценивали маркеры нейровоспаления и демиелинизации, такие как количество активированных микроглиальных клеток и изменения в составе миелина. Результаты показали, что левамизол усиливает патологические процессы в условиях существующего воспаления, что позволяет предположить риск развития воспалительной лейкоэнцефалопатии у пациентов с предрасположенностью к аутоиммунным заболеваниям при приеме данного препарата [25].

Наше клиническое наблюдение представлено с целью повысить осведомленность практикующих врачей (терапевтов, неврологов, врачей общей практики, радиологов) о тяжести возможных осложнений применения левамизола и продемонстрировать роль точного сбора анамнеза в дифференциальной диагностике. От пациента получено письменное информированное согласие на публикацию его клинических подробностей и результатов инструментальных исследований.

Описание случая / Case report

Мужчина, 47 лет, обратился к неврологу Больницы Медицинского центра Управления делами Президента Республики Казахстан с жалобами на ухудшение памяти, периодическое поперхивание при глотании, шаткость при ходьбе, кратковременные приступы потери сознания, снижение концентрации внимания, головные боли, общую слабость, утомляемость.

Анамнез заболевания

Из анамнеза заболевания известно, что пациент считает себя больным около 2 лет. В начале весны 2023 г. из-за зуда в области ануса с целью профилактики он по рекомендации коллег принял противопаразитарный препарат Ketress (левамизол), несколько лет назад у пациента на этот препарат отмечались реакции – гипертермия и головные боли. В апреле 2023 г. появились забывчивость, затруднение запоминания новой информации, медлительность при выполнении задач на работе, снижение концентрации внимания.

В мае 2023 г. впервые возникли субфебрильная гипертермия, тошнота, изжога, рвота, головокружение. Субфебрильная температура отмеча-

² Национальный центр экспертизы лекарственных средств и медицинских изделий Комитета медицинского и фармацевтического контроля Министерства здравоохранения Республики Казахстан (<https://www.ndda.kz>).

лась в течение 3–4 дней. Тогда пациент находился за границей, был госпитализирован в стационар, в связи с улучшением общего самочувствия выписан (выписки на руках не имеется). Также на работе впервые кратковременно потерял сознание – рядом находились коллеги, и когда сознание восстанавливалось, пациент не смог их узнать. Доставлен в стационар, где проведена магнитно-резонансная томография (МРТ) головного мозга с подозрением на метастазы, туберкулез, очаги демиелинизации. Рекомендована люмбальная пункция – пациент воздержался. В динамике отмечает присоединение таких симптомов, как шаткость, периодическое двоение в глазах, невнятность речи.

После приезда в Казахстан пациент обратился к неврологу в поликлинику Больницы Медицинского центра Управления делами Президента Республики Казахстан, после госпитализирован для верификации диагноза и лечения в отделение неврологии, где находился 12 дней.

Из анамнеза жизни известно, что пациент переносил острые респираторные вирусные инфекции, описторхоз. Аллергологический и наследственный анамнезы не отягощены. Вредные привычки отрицает.

Неврологический статус при госпитализации

Сознание ясное (15 баллов по шкале комы Глазго), реакция на окружающее адекватная, менингеальные симптомы отрицательны, мнестические нарушения. Черепно-мозговые нервы: глазные щели D=S, зрачки OD=OS. Фотореакции сохранены. Диплопия, нистагм отсутствуют. Движения глазных яблок в полном объеме. Язык по средней линии. Акт глотания не нарушен. Речь не нарушена. Рефлекс орального автоматизма отсутствует. Парезов, параличей не выявлено. Двигательная система: дискомфорт в грудном отделе позвоночника, дефанс мышц шейного и грудного отделов позвоночника. Пальпация паравертебральных точек на уровне шейного, грудного отделов позвоночника болезненна. Симптомов натяжения нет. Симптомов выпадения нет. Рефлексы D=S, живые. Координация движений: не нарушена, в пробе Ромберга легкая атаксия. Вегетативная нервная система не нарушена. Высшие корковые функции не нарушены. Психический статус не нарушен.

В отделении проведена дифференциальная диагностика демиелинизирующей патологии центральной нервной системы, в частности РС, заболеваний спектра оптиконейромиелита, острого рассеянного энцефаломиелита (ОРЭМ), левамизол-индуцированной лейкоэнцефалопатии, нейроинфекции, неопроцесса (метастазов). Проведены лабораторные и инструментальные исследования.

Результаты лабораторных исследований

Общий анализ крови от 13.06.2023 г.: в пределах нормы.

Общий анализ мочи от 13.06.2023 г.: в пределах нормы.

Биохимический анализ крови от 13.06.2023 г.: в пределах нормы.

Тесты на вирус иммунодефицита человека, микрореакцию от 15.06.2023 г.: отрицательно.

Серологические маркеры вирусных гепатитов (поверхностный антиген вируса гепатита В, вирус гепатита С) от 15.06.2023 г.: отрицательно.

Исследование кала на яйца гельминтов и простейшие от 11.07.2023 г.: не обнаружены.

Онкомаркеры в сыворотке крови (простатический специфический антиген – свободный и общий, раковый эмбриональный антиген, альфа-фетопротеин, антиген плоскоклеточной карциномы, фрагмент цитокератина 19 – Cyfra 21-1) от 11.07.2023 г.: в пределах нормы.

Показатели гуморального звена иммунитета от 11.07.2023 г.: иммуноглобулин А 2,2 г/л.

Общеклиническое исследование спинномозговой жидкости (СМЖ) от 20.06.2023 г.: эритроциты 1–3 в поле зрения, хлориды 132,00 ммоль/л, натрий 193,90 ммоль/л, реакция pH 8,0, цвет бесцветный, СМЖ прозрачная, относительная плотность СМЖ 1,005, цитоз в 1 мкл – 1,2 клеток/мкл, ксантохромия – отрицательно, белок в СМЖ 0,324 г/л, глюкоза 5,1 ммоль/л, калий 2,66 ммоль/л.

Цитологическое исследование СМЖ от 20.06.2023 г.: в материале определяются единичные лимфоциты, а также единичные эпидимотициты на фоне небольшого скопления зернистого нейтрофила, другие элементы не обнаружены.

Диагностика СМЖ методом полимеразно-цепной реакции (ПЦР) (*Candida albicans*, *Toxoplasma gondii*, *Mycobacterium tuberculosis*, вирус Эпштейна–Барр (качественная и количественная), вирус простого герпеса 1, 2, цитомегаловирус, вирус Варицелла–Зостер) от 20.06.2023: отрицательные.

Анализ крови на антитела к аквапорину-4 от 20.06.2023 г.: отрицательный.

Анализ крови и СМЖ на олигоклональные антитела от 20.06.2023 г.: тип 1.

Результаты инструментальных исследований

Компьютерная томография органов грудной клетки без контраста от 13.06.2023 г.: воспалительных изменений в легких не выявлено, локальный пневмофиброз справа, целомическая киста перикарда.

На МРТ головного мозга (3 Тл) с контрастом 7,5 мл от 15.06.2023 г. выявлены множественные очаги демиелинизации в больших полушариях, парагиппокампаально, поясных извилинах,

в перивентрикулярном белом веществе, а также в мозолистом теле, стволе мозга и гемисферах мозжечка, преимущественно продолговатой формы, шириной от 0,2 до 2,0 см, некоторые с перифокальным отеком, местами сливающиеся между собой (рис. 1). Данные очаги без рестрикции на DWI и картах ADC. При контрастировании мелкие очаги диффузно, крупные очаги кольцевидно накапливают контрастное вещество. Дополнительно в структуре спинного мозга на уровне сегмента С2 выявлен очаг продолговатой формы, размерами 0,6×0,3 см, а также врожденная венотоническая дисплазия правой гемисферы мозжечка (рис. 2). Рекомендовано дообследование спинного мозга и МРТ-контроль через 3–6 мес. Сравнение с МРТ-данными головного мозга от 12.03.2019 г. показало, что данных очагов ранее не прослеживалось (рис. 3).

Терапия

В стационаре пациенту проведена патогенетическая терапия – пульс-терапия метилпреднизолоном в течение 5 дней, один сеанс плазмафе-

реза, но с учетом гипопроотеинемии продолжение отложено. На фоне терапии отмечено значимое улучшение общего самочувствия, регресс диплопии, атаксии, общемозговой симптоматики, улучшение памяти, полное восстановление, пациент возвратился на работу.

На основании клинико-инструментальных исследований и анамнеза заболевания выставлен диагноз левамизол-индуцированной лейкоэнцефалопатии.

Динамика на фоне лечения

При контрольном проведении МРТ головного мозга (1,5 Тл) с контрастом 7,5 мл от 11.07.2023 г. (через 1 мес после начала лечения) определяется положительная динамика в сравнении с предыдущим исследованием – уменьшились размеры ранее описанных демиелинизирующих очагов в полушариях большого мозга, в стволовых структурах и гемисферах мозжечка практически без перифокального отека (рис. 4).

На многовоксельной МР-спектроскопии головного мозга (3 Тл) без контраста от 11.07.2023 г.

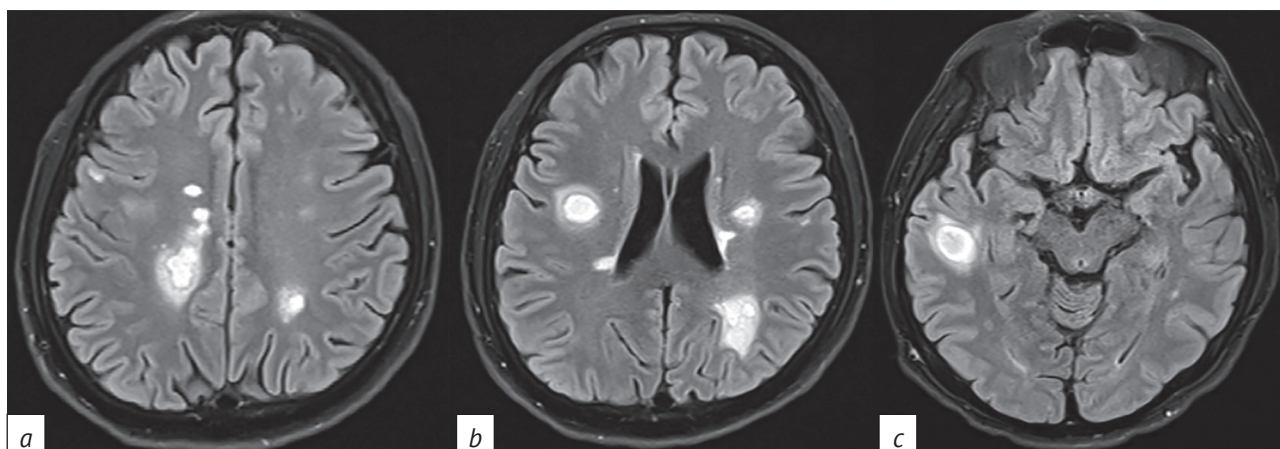
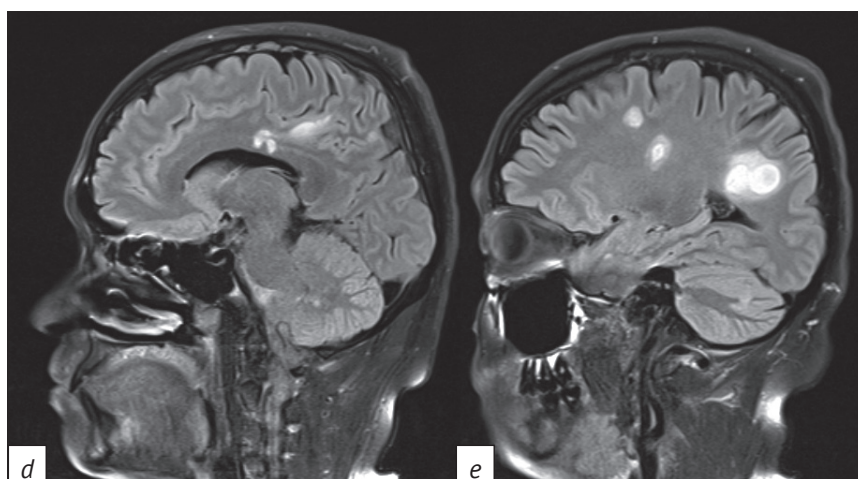


Рис. 1. МР-томограммы головного мозга в аксиальной (а–с) и сагитальной (d, e) проекциях в режиме T2 dark fluid от 15.06.2023 г.: множественные гиперинтенсивные очаги в больших полушариях, парагиппокампально, в поясных извилинах, перивентрикулярном белом веществе, а также в мозолистом теле, стволе мозга и гемисферах мозжечка, преимущественно продолговатой формы, шириной от 0,2 до 2,0 см, некоторые с перифокальным отеком, местами сливающиеся между собой

Fig. 1. Brain MRI scans. Axial (a–c) and sagittal (d, e) planes, T2 dark fluid mode, 15.06.2023: multiple hyperintense foci in the cerebral hemispheres, parahippocampal, in cingulate gyri, periventricular white matter, as well as in the corpus callosum, brainstem and cerebellar hemispheres, predominantly oblong in shape, 0.2 to 2.0 cm wide, some with perifocal edema, merging with each other in places



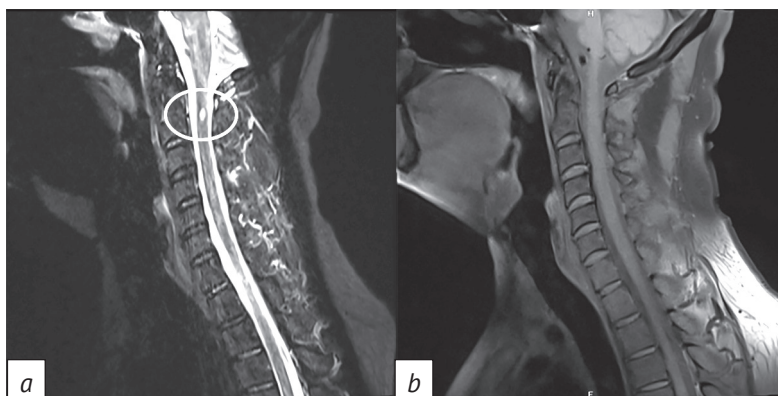


Рис. 2. МР-томограммы спинного мозга шейного отдела позвоночника в сагиттальной проекции в режимах Т2 (а) и Т1 (б) от 20.06.2023 г: интрамедуллярный очаг на уровне сегмента С2, вероятнее всего, демиелинизирующего характера

Fig. 2. MRI scans of the spinal cord of cervical spine, sagittal plane. T2 (a) and T1 (b) modes, 20.06.2023: intramedullary lesion at the level of the C2 segment, most likely of a demyelinating nature

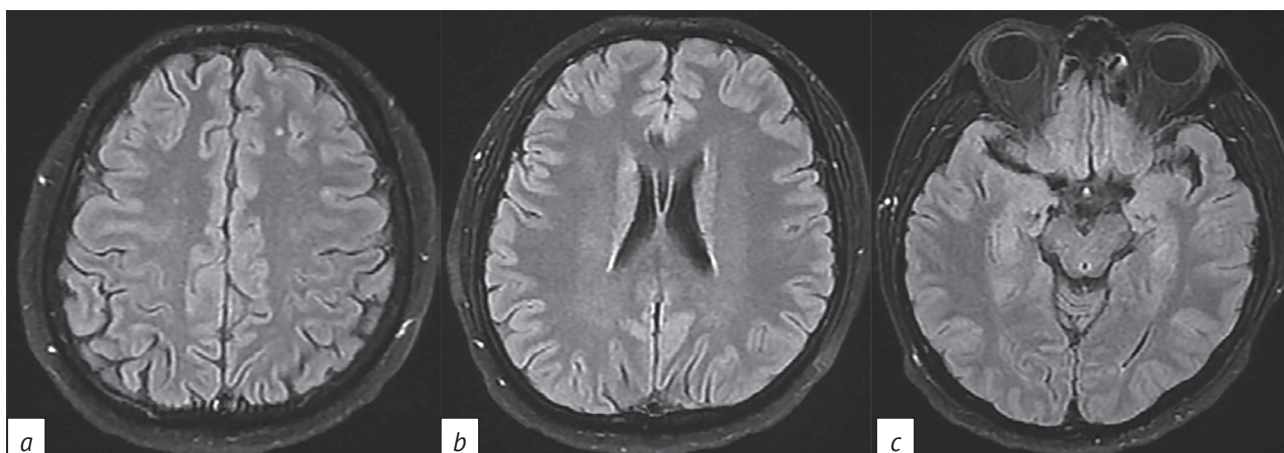


Рис. 3. МР-томограммы головного мозга в аксиальной проекции в режиме Т2 FLAIR от 12.03.2019 г. (а–с): единичные очаги микроангиопатии головного мозга

Fig. 3. Brain MRI scans, axial plane, T2 FLAIR mode, 12.03.2019 (a–c): single foci of cerebral microangiopathy

данных за неопроцесс со стороны структур головного мозга не выявлено. При ретроспективном анализе отмечается положительная динамика.

При повторных исследованиях головного и спинного мозга шейного отдела позвоночника от 21.09.2023 г. (рис. 5, 6), 15.03.2024 г. (рис. 7, 8) ранее описанные множественные гиперинтенсивные очаги в полушариях большого мозга, стволовых структурах и гемисферах мозжечка, интрамедуллярный очаг на уровне С2-позвонка в динамике без изменений.

На МРТ головного мозга с контрастом от 22.12.2024 г. по сравнению с предыдущей МРТ значимых изменений не выявлено. Персистирующие гиперинтенсивные очаги в перивентрикулярном и субкортикальном белом веществе, рассеянные в обоих полушариях, вызывают подозрение на демиелинизирующее заболевание (рис. 9). В дифференциальный ряд могут входить также хронические микроангиопатические изменения, васкулиты и аутоиммунные заболевания. Рекомендуются клиническая корреляция и дальнейшее наблюдение.

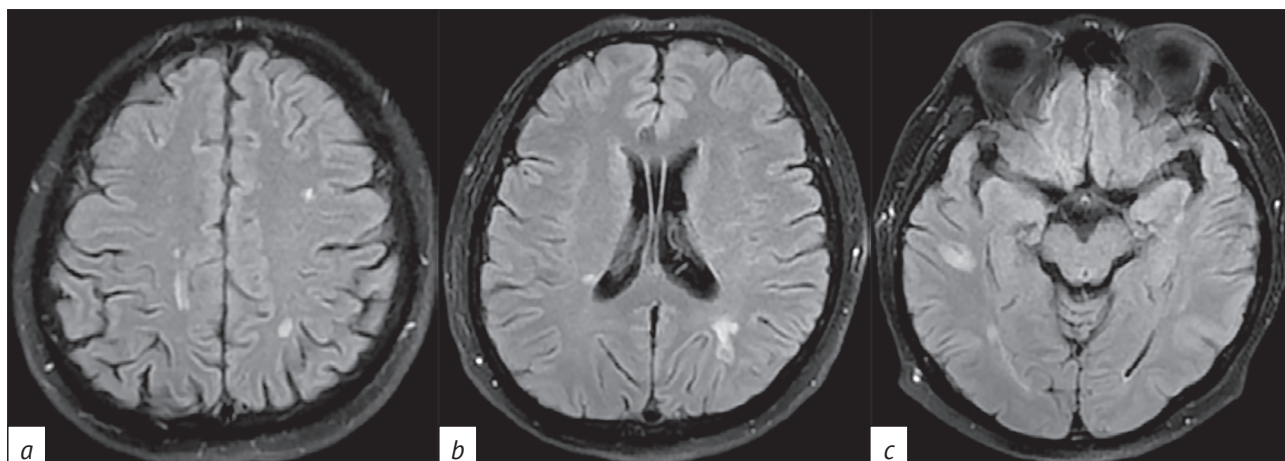
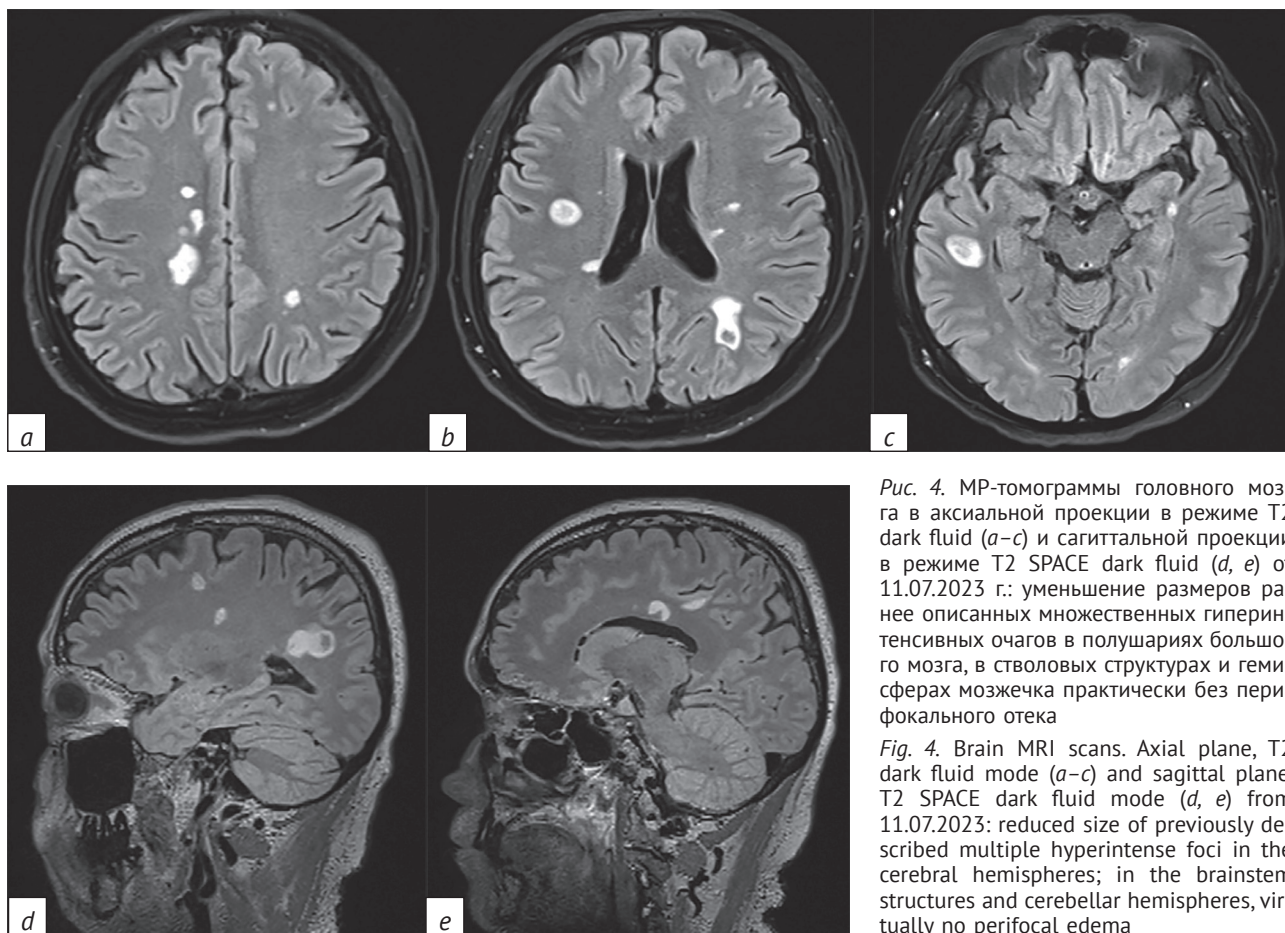
При МРТ шейного отдела позвоночника от 22.12.2024 г. обнаружен паравертебральный мы-

шечный спазм. Повторное выявление короткого интрамедуллярного участка гиперинтенсивного сигнала на STIR-программах без признаков контрастного усиления, расположенного напротив тела позвонка С2 (рис. 10). Учитывая анамнез пациента, нельзя исключить возможность постинфекционной демиелинизации. Рекомендуется клиническая корреляция.

Обсуждение / Discussion

Левамизол-индуцированная лейкоэнцефалопатия чаще всего описывается в связи с употреблением кокаина, однако данный клинический случай демонстрирует, что это состояние может развиваться и при отдельном применении левамизола, вне зависимости от дозы. В представленном наблюдении из анамнеза известно, что пациент дважды самостоятельно принимал препарат в целях «профилактики» паразитарного заболевания.

К сожалению, левамизол часто назначается терапевтами и инфекционистами. Показания к применению этого препарата содержат ограничения, однако в Казахстане левамизол продается



в свободном доступе. Развитие и течение заболевания, клинические проявления, детально собранный лекарственный анамнез, изменения на МРТ головного и спинного мозга помогли выявить и выставить диагноз левамизол-индуцированной лейкоэнцефалопатии.

Лабораторные анализы крови и СМЖ (ПЦР ликвора на инфекции, анализ крови на аквапорин-4, олигоклональные антитела из крови и СМЖ) дополнительно помогли в установлении диагноза и исключении таких патологий, как РС, заболевания спектра оптиконейромиелита, кото-



Рис. 6. МР-томограммы спинного мозга шейного отдела позвоночника в сагиттальной проекции в режимах Т2 (а), Т1 (b), STIR (с) от 21.09.2023 г.: ранее наблюдавшийся интрамедуллярный очаг на уровне позвонка С2 в динамике сохраняется

Fig. 6. MRI scans of the spinal cord of cervical spine, sagittal plane. T2 (a), T1 (b), STIR (c) modes, 21.09.2023: the previously observed intramedullary lesion at the level of C2 vertebra persists in dynamics

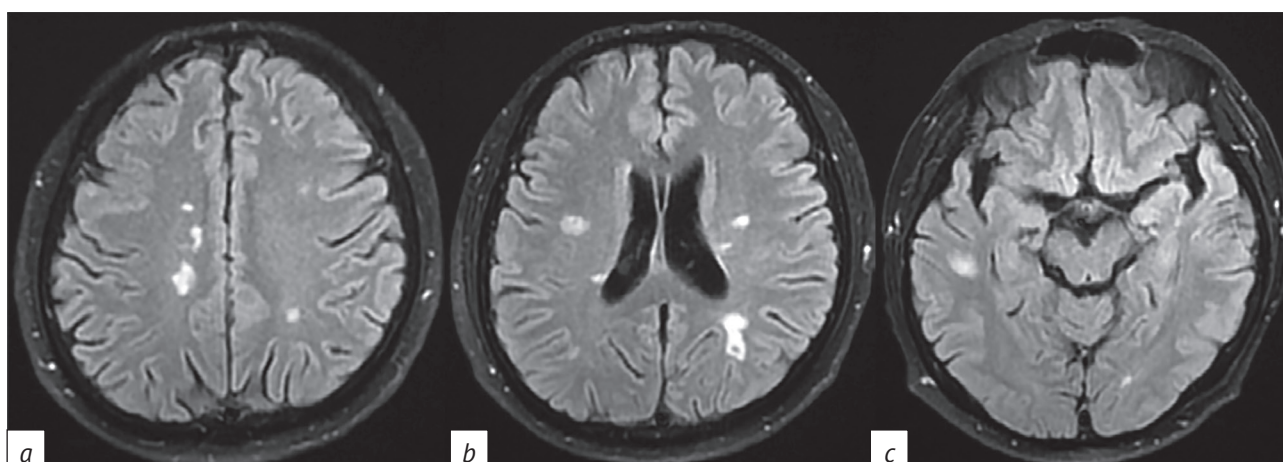


Рис. 7. МР-томограммы головного мозга в аксиальной проекции в режиме Т2 FSat FLAIR от 15.03.2024 г. (а-с): ранее описанные множественные гиперинтенсивные очаги в полушариях большого мозга в динамике без существенных изменений

Fig. 7. Brain MRI scans, axial plane, T2 FSat FLAIR mode, 15.03.2024 (a-c): previously described multiple hyperintense foci in the cerebral hemispheres in dynamics without significant changes



Рис. 8. МР-томограммы спинного мозга шейного отдела позвоночника в сагиттальной проекции в режимах Т2 (а), Т1 (b), STIR (с) от 15.03.2024 г.: ранее наблюдавшийся интрамедуллярный очаг на уровне позвонка С2 в динамике сохраняется

Fig. 8. MRI scans of the spinal cord of cervical spine, sagittal plane. T2 (a), T1 (b), STIR (c) modes, 15.03.2024: the previously observed intramedullary lesion at the level of C2 vertebra persists in dynamics

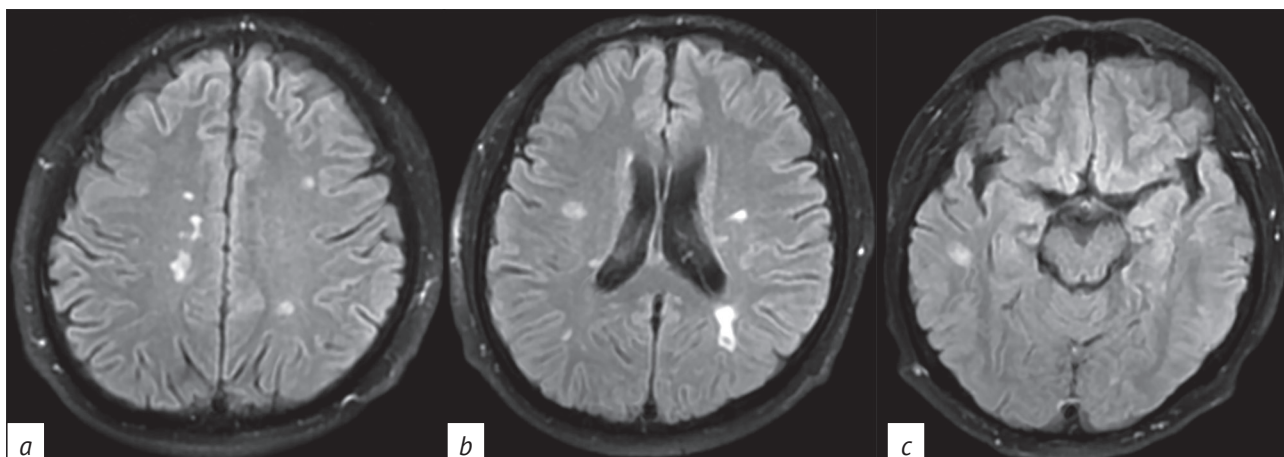


Рис. 9. МР-томограммы головного мозга в аксиальной проекции в режиме T2 FSat FLAIR от 22.12.2024 г. (a–c): по сравнению с предыдущей МРТ, значимых изменений не выявлено. Персистирующие гиперинтенсивные очаги в перивентрикулярном и субкортикальном белом веществе, рассеянные в обоих полушариях, вызывают подозрение на демиелинизирующее заболевание. В дифференциальный ряд могут входить также хронические микроангиопатические изменения, васкулиты и аутоиммунные заболевания

Fig. 9. Brain MRI scans, axial plane, T2 FSat FLAIR mode, 22.12.2024 (a–c): compared to the previous MRI, no significant changes were detected. Persistent hyperintense foci in the periventricular and subcortical white matter, scattered in both hemispheres, raise suspicion of a demyelinating disease. The differential series may also include chronic microangiopathic changes, vasculitis, and autoimmune diseases



Рис. 10. МР-томограммы спинного мозга шейного отдела позвоночника в сагиттальной проекции в режимах T2 (a), T1 (b), STIR (c) от 22.12.2024 г.: паравертебральный мышечный спазм. Повторное выявление короткого интрамедуллярного участка гиперинтенсивного сигнала на STIR-программах без признаков контрастного усиления, расположенного напротив тела позвонка C2

Fig. 10. MRI scans of the spinal cord of cervical spine, sagittal plane. T2 (a), T1 (b), STIR (c) modes, 22.12.2024: paravertebral muscle spasm. Repeated detection of a short intramedullary area of hyperintense signal on STIR programs without signs of contrast enhancement, located opposite the body of C2 vertebra

рые требуют специфической поддерживающей терапии.

Пациент осмотрен онкологом. Проведен онкопоиск, убедительных данных за онкологические и лимфопролиферативные заболевания не выявлено.

Основным дифференциальным диагнозом в данном случае стал РС. Для постановки диагноза РС в соответствии с критериями Мак-Дональда 2017 г. необходимо соблюдение одного из пяти

групп критериев в зависимости от количества клинических атак (табл. 1) [26]. У больного наблюдалась 1 клиническая атака в виде клинически изолированного синдрома, более 2 очагов поражения на МРТ головного мозга и наличие объективных клинических признаков. Однако для постановки диагноза РС требуется еще наличие диссеминации во времени или олигоклональных СМЖ-специфических антител. У пациента выявлен 1-й тип олигоклональных антител, что не подтверждает

Таблица 1

Критерии для постановки диагноза рассеянного склероза [26]

Table 1

Criteria for diagnosis of multiple sclerosis [26]

Количество клинических атак / Number of clinical attacks	Количество поражений с объективными клиническими данными / Number of lesions with objective clinical data	Дополнительные данные, необходимые для диагностики рассеянного склероза / Additional data needed for a diagnosis of multiple sclerosis
≥2 клинических атак / ≥2 clinical attacks	≥2 очагов и наличие объективных клинических признаков / ≥2 lesions and objective clinical signs	Не требуется* / None*
	1 очаг, наличие объективных клинических признаков и анамнез, предполагающий наличие старых очагов / 1 lesion, objective clinical signs and anamnesis suggesting old lesions	Не требуется* / None*
	1 очаг, наличие объективных клинических признаков без анамнеза, предполагающего наличие предыдущих очагов / 1 lesion, objective clinical signs, no anamnesis suggesting old lesions	Наличие диссеминации в пространстве при МРТ / Dissemination in space demonstrated by MRI
1 клиническая атака / 1 clinical attack	≥2 очагов и наличие объективных клинических признаков / ≥2 lesions and objective clinical signs	Наличие диссеминации во времени при МРТ или олигоклональных СМЖ-специфических антител / Dissemination in time demonstrated by MRI or demonstration of CSF-specific oligoclonal bands
	1 очаг, наличие объективных клинических признаков / 1 lesion, objective clinical signs	Наличие диссеминации в пространстве при МРТ Наличие диссеминации во времени при МРТ или наличие олигоклональных СМЖ-специфических антител / Dissemination in space demonstrated by MRI Dissemination in time demonstrated by MRI or demonstration of CSF-specific oligoclonal bands

Примечание. МРТ – магнитно-резонансная томография; СМЖ – спинномозговая жидкость. * Никаких дополнительных тестов не требуется для подтверждения диссеминации в пространстве и времени.

Note. MRI – magnetic resonance imaging; CSF – cerebrospinal fluid. * No additional tests are required to demonstrate dissemination in space and time.

РС, но вероятность РС в таком случае составляет около 13% [27].

Диссеминация во времени исключалась ввиду отсутствия одновременно гадолиний(+) и гадолиний(–) очагов. При повторном контрольном исследовании новых очагов не выявлено. Соответственно, для постановки РС недостаточно данных.

Особый интерес представляет вопрос о дозозависимости токсичности левамизола. По данным литературы, неврологические осложнения, такие как левамизол-индуцированная лейкоэнцефалопатия, могут возникать как при терапевтических, так и при высоких дозах препарата. В нашем случае симптомы начали проявляться через несколько недель после приема левамизола, что подчеркивает необходимость полного сбора лекарственного анамнеза, мониторинга пациентов, получающих левамизол, даже при использовании его в рекомендованных дозировках.

При своевременной диагностике мультифокальной лейкоэнцефалопатии, вызванной левамизолом, большинство пациентов положительно отвечают на лечение, что приводит к значительному регрессу клинической картины и улучшению МРТ-картины.

Заключение / Conclusion

В случаях, подобных представленному в данной статье, тщательный сбор анамнеза играет важную роль, так как существует риск отсрочки постановки правильного диагноза по причине неполного сбора анамнеза, когда пациенты считают, что это не взаимосвязанные вещи и не сообщают врачам о применении левамизола.

Стоимость препарата низкая, информирование населения об опасности самостоятельного применения лекарственного вещества минимальное, поэтому описанный клинический случай

подтверждает важность внимательного наблюдения за пациентами, получающими левамизол, и своевременной диагностики осложнений, таких как лейкоэнцефалопатия. Необходимо повышать

осведомленность врачей о редких, но серьезных побочных эффектах данного препарата и возможности их развития независимо от контекста употребления наркотиков.

Литература / References

- Howelland M, Prevenier W. From reliable sources: an introduction to historical methods. Cornell University Press; 2001: 77 pp.
- Thompson JS, Herbeck JM, Klassen LW, et al. Studies on levamisole-induced agranulocytosis. *Blood*. 1980; 56(3): 388–96.
- Scheinfeld N, Rosenberg JD, Weinberg JM. Levamisole in dermatology: a review. *Am J Clin Dermatol*. 2004; 5(2): 97–104. <https://doi.org/10.2165/00128071-200405020-00004>.
- Moertel CG, Fleming TR, Macdonald JS, et al. Levamisole and fluorouracil for adjuvant therapy of resected colon carcinoma. *New Engl J Med*. 1990; 322(6): 352–8. <https://doi.org/10.1056/NEJM199002083220602>.
- Wolford A, McDonald TS, Eng H, et al. Immune-mediated agranulocytosis caused by the cocaine adulterant levamisole: a case for reactive metabolite(s) involvement. *Drug Metab Dispos*. 2012; 40(6): 1067–75. <https://doi.org/10.1124/dmd.112.045021>.
- Rongioletti F, Ghio L, Ginevri F, et al. Purpura of the ears: a distinctive vasculopathy with circulating autoantibodies complicating long-term treatment with levamisole in children. *Br J Dermatol*. 1999; 140(5): 948–51. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2133.1999.02833.x>.
- Karch SB, Mari F, Bartolini V, Bertol E. Aminorex poisoning in cocaine abusers. *Int J Cardiol*. 2012; 158(3): 344–6. <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2011.06.105>.
- WHO model list of essential medicines – 21st list, 2019. Available at: <https://www.who.int/publications/i/item/WHOMVPEMPIAU2019.06> (accessed 03.11.2024).
- Campillo JT, Eiden C, Boussinesq M, et al. Adverse reactions with levamisole vary according to its indications and misuse: a systematic pharmacovigilance study. *Br J Clin Pharmacol*. 2022; 88(3): 1094–106. <https://doi.org/10.1111/bcp.15037>.
- Larocque A, Hoffman RS. Levamisole in cocaine: unexpected news from an old acquaintance. *Clin Toxicol*. 2012; 50(4): 231–41. <https://doi.org/10.3109/15563650.2012.665455>.
- Midthun KM, Nelson LS, Logan BK. Levamisole – a toxic adulterant in illicit drug preparations: a review. *Ther Drug Monit*. 2021; 43(2): 221–8. <https://doi.org/10.1097/FTD.851>.
- Zakharova M, Zakroyshchikova I, Kozlova A, et al. Levamisole-induced leukoencephalopathy in Russia: analysis of 30 cases. *Curr Drug Saf*. 2022; 17(4): 319–26. <https://doi.org/10.2174/1574886317666211224121517>.
- Brunt TM, van den Berg J, Pennings E, Venhuis B. Adverse effects of levamisole in cocaine users: a review and risk assessment. *Arch Toxicol*. 2017; 91(6): 2303–13. <https://doi.org/10.1007/s00204-017-1947-4>.
- Wu VC, Huang JW, Lien HC, et al. Levamisole-induced multifocal inflammatory leukoencephalopathy: clinical characteristics, outcome, and impact of treatment in 31 patients. *Medicine*. 2006; 85(4): 203–13. <https://doi.org/10.1097/01.md.0000230250.95281.60>.
- Hook CC, Kimmel DW, Kvols LK, et al. Multifocal inflammatory leukoencephalopathy with 5-fluorouracil and levamisole. *Ann Neurol*. 1992; 31(3): 262–7. <https://doi.org/10.1002/ana.410310306>.
- Fassas AB, Gattani AM, Morgello S. Cerebral demyelination with 5-fluorouracil and levamisole. *Cancer Invest*. 1994; 12(4): 379–83. <https://doi.org/10.3109/07357909409038226>.
- Kimmel DW, Wijdsicks EF, Rodriguez M. Multifocal inflammatory leukoencephalopathy associated with levamisole therapy. *Neurology*. 1995; 45(2): 374–6. <https://doi.org/10.1212/wnl.45.2.374>.
- Luppi G, Zoboli A, Barbieri F, et al. Multifocal leukoencephalopathy associated with 5-fluorouracil and levamisole adjuvant therapy for colon cancer. A report of two cases and review of the literature. *The INTACC. Intergruppo Nazionale Terpia Adjuvante Colon Carcinoma*. *Ann Oncol*. 1996; 7(4): 412–5. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.annonc.a010610>.
- Liu HM, Hsieh WJ, Yang CC, et al. Leukoencephalopathy induced by levamisole alone for the treatment of recurrent aphthous ulcers. *Neurology*. 2006; 67(6): 1065–7. <https://doi.org/10.1212/01.wnl.0000237344.06122.79>.
- Xu N, Zhou W, Li S, et al. Clinical and MRI characteristics of levamisole-induced leukoencephalopathy in 16 patients. *J Neuroimaging*. 2009; 19(4): 326–31. <https://doi.org/10.1111/j.1552-6569.2008.00344.x>.
- Figueredo AT, Fawcett SE, Molloy DW, et al. Disabling encephalopathy during 5-fluorouracil and levamisole adjuvant therapy for resected colorectal cancer: a report of two cases. *Cancer Invest*. 1995; 13(6): 608–11. <https://doi.org/10.3109/07357909509024930>.
- Cossaart N, SantaCruz KS, Preston D, et al. Fatal chemotherapy-induced encephalopathy following high-dose therapy for metastatic breast cancer: a case report and review of the literature. *Bone Marrow Transpl*. 2003; 31(1): 57–60. <https://doi.org/10.1038/sj.bmt.1703768>.
- Chastel C, Mabin D. Encephalopathies after levamisole therapy. *Neurology*. 1996; 46(1): 288. <https://doi.org/10.1212/wnl.46.1.288>.
- Zheng R. Differential diagnosis of delayed encephalopathy induced by anthelmintic imidazoles. *Zhonghua Nei Ke Za Zhi*. 1995; 34(7): 468–71 (in Chinese).
- Lucchinetti CF, Kimmel DW, Pavelko K, Rodriguez M. 5-Fluorouracil and levamisole exacerbate demyelination in susceptible mice infected with Theiler's virus. *Exp Neurol*. 1997; 147(1): 123–9. <https://doi.org/10.1006/exnr.1997.6598>.
- Thompson AJ, Banwell BL, Barkhof F, et al. Diagnosis of multiple sclerosis: 2017 revisions of the McDonald criteria. *Lancet Neurol*. 2018; 17(2): 162–73. [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(17\)30470-2](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(17)30470-2).
- Dobson R, Ramagopalan S, Davis A, Giovannoni G. Cerebrospinal fluid oligoclonal bands in multiple sclerosis and clinically isolated syndromes: a meta-analysis of prevalence, prognosis and effect of latitude. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*. 2013; 84(8): 909–14. <https://doi.org/10.1136/jnnp-2012-304695>.



Современное клиническое применение искусственного интеллекта в медицинской визуализации

Нуднов Н.В.^{1,2,3}, Паньшин Г.А.¹

¹ ФГБУ «Российский научный центр рентгенорадиологии» Минздрава России, ул. Профсоюзная, 86, Москва, 117997, Российская Федерация

² ФГБОУ ДПО «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования» Минздрава России, ул. Баррикадная, 2/1, стр.1, Москва, 125993, Российская Федерация

³ ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы», ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, 117198, Российская Федерация

Нуднов Николай Васильевич, д. м. н., профессор, зам. директора по научной работе, заведующий научно-исследовательским отделом комплексной диагностики заболеваний и радиотерапии ФГБУ «Российский научный центр рентгенорадиологии» Минздрава России, профессор кафедры рентгенологии и радиологии ФГБОУ ДПО «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования» Минздрава России, зам. директора по научной работе, профессор кафедры онкологии и рентгенорадиологии ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы»; <http://orcid.org/0000-0001-5994-0468>

Паньшин Георгий Александрович, д. м. н., профессор, гл. науч. сотр. лаборатории лучевой терапии и комплексных методов лечения онкологических заболеваний научно-исследовательского отдела комплексной диагностики заболеваний и радиотерапии ФГБУ «Российский научный центр рентгенорадиологии» Минздрава России; <http://orcid.org/0000-0003-1106-6358>

Резюме

В настоящее время искусственный интеллект (ИИ) весьма эффективно развивается, а его приложения ценны во многих областях науки, в том числе и медицинской, – главным образом из-за его способности обеспечить точность, объективность и автоматизацию. Стремительное развитие диагностических технологий предоставляет возможность внедрять в современную медицину инновационные решения с применением ИИ, позволяющего разгрузить медицинских работников за счет ускорения процесса диагностики и в то же время повысить его качество, а также эффективность последующего специального лечения. В обзоре кратко представлены текущее состояние знаний и ряд существующих моделей ИИ, используемых в повседневной практике в сфере медицинской визуализации. Показано, что ИИ обладает огромным потенциалом для преобразования рентгенодиагностики и других областей медицины, особенно при анализе медицинских изображений. Несмотря на трудности, связанные с внедрением ИИ в практическую деятельность, такие как необходимость надлежащего обучения персонала и этические проблемы, преимущества его применения весьма значительны. ИИ может помочь повысить точность диагностики, ускорить сам процесс диагностирования и сократить расходы на медицинское обслуживание. Дальнейшее развитие технологий ИИ в сочетании с постоянным сотрудничеством между российскими разработчиками ИИ и медицинскими работниками будет способствовать еще большим достижениям в области здравоохранения, которые принесут несомненную пользу как пациентам, так и персоналу лечебных учреждений.

Ключевые слова: искусственный интеллект; диагностическая визуализация; клиническая практика; направления развития; обзор.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Нуднов Н.В., Паньшин Г.А. Современное клиническое применение искусственного интеллекта в медицинской визуализации. *Вестник рентгенологии и радиологии*. 2024; 105(6): 325–334. <https://doi.org/10.20862/0042-4676-2024-105-6-325-334>

Для корреспонденции: Нуднов Николай Васильевич, e-mail: mailbox@rncrr.rssi.ru

Статья поступила 06.02.2025

После доработки 15.03.2025

Принята к печати 16.03.2025

Current Clinical Application of Artificial Intelligence in Medical Imaging

Nikolay V. Nudnov^{1,2,3}, Georgiy A. Pan'shin¹

¹ Russian Scientific Center of Roentgenoradiology,
ul. Profsoyuznaya, 86, Moscow, 117997, Russian Federation

² Russian Medical Academy of Continuing Professional Education,
ul. Barrikadnaya, 2/1, str.1, Moscow, 125993, Russian Federation

³ Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba,
ul. Miklukho-Maklaya, 6, Moscow, 117198, Russian Federation

Nikolay V. Nudnov, Dr. Med. Sc., Professor, Deputy Director for Scientific Work, Head of Research Department of Complex Diagnostics of Diseases and Radiotherapy, Russian Scientific Center of Roentgenoradiology; Professor, Chair of Radiology and Nuclear Medicine, Russian Medical Academy of Continuing Professional Education; Deputy Director for Scientific Work, Professor, Chair of Oncology and Roentgenology, Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba;
<http://orcid.org/0000-0001-5994-0468>

Georgiy A. Pan'shin, Dr. Med. Sc., Professor, Senior Researcher, Laboratory of Radiation Therapy and Complex Methods of Cancer Treatment, Research Department of Complex Diagnostics of Diseases and Radiotherapy, Russian Scientific Center of Roentgenoradiology;
<http://orcid.org/0000-0003-1106-6358>

Abstract

Artificial intelligence (AI) is currently developing very efficiently, and its applications are valuable in many fields of science, including medicine, mainly because of its ability to ensure accuracy, objectivity and automation, in particular, in the diagnostic process. Rapid development of diagnostic technologies provides an opportunity to introduce innovative solutions into modern medicine through the use of AI, which makes it possible to relieve medical workers by speeding up the diagnostic process and improving its quality as well as effectiveness of subsequent special treatment based on its results. This review briefly presents the current state of knowledge and a number of existing AI models applied in everyday practice in medical imaging. AI has great potential to transform X-ray diagnostics and other areas of medicine, especially in the analysis of medical images. Despite the difficulties associated with AI implementation in practice, such as the need for proper staff training and ethical issues, the advantages of its application are very significant. AI can help improve diagnostic accuracy, speed up the diagnostic process itself, and reduce medical costs. Further development of AI technologies combined with the constant cooperation between Russian AI developers and medical professionals will contribute to even greater advances in healthcare, which will undoubtedly benefit both patients and staff of medical institutions.

Keywords: artificial intelligence; diagnostic visualization; clinical practice; directions of development; review.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

For citation: Nudnov NV, Pan'shin GA. Current clinical application of artificial intelligence in medical imaging. *Journal of Radiology and Nuclear Medicine*. 2024; 105(6): 325–334 (in Russian). <https://doi.org/10.20862/0042-4676-2024-105-6-325-334>

For corresponding: Nikolay V. Nudnov, e-mail: mailbox@rncrr.rssi.ru

Received February 6, 2025

Revised March 15, 2025

Accepted March 16, 2025

Введение / Introduction

Искусственный интеллект (ИИ) представляет собой моделирование человеческого интеллекта в машинах, которые запрограммированы думать и учиться как люди. Он включает в себя разработку алгоритмов и компьютерных систем, способных выполнять задачи, которые обычно требуют человеческого мышления, адаптивности и моделирования когнитивных процессов. При этом ИИ охватывает широкий спектр методов и технологий, направленных на создание систем, умеющих рассуждать, решать проблемы, воспринимать и обучаться.

Достижения в области медицинской визуализации и ИИ открыли новую эру возможностей в области здравоохранения. Слияние этих двух областей произвело революцию в различных аспектах медицинской практики – от раннего выявления заболеваний и точной диагностики до персонализированного планирования лечения и улучшения его результатов.

На сегодняшний день такие методы медицинской визуализации, как компьютерная томография (КТ), магнитно-резонансная томография (МРТ) и позитронно-эмиссионная томография, предоставляют врачам-диагностам подробную

и всеобъемлющую визуальную информацию о человеческом организме. Они генерируют огромные объемы данных, требующих эффективного адекватного анализа и интерпретации, которые возможны с помощью ИИ. Алгоритмы ИИ, в частности глубокое обучение, продемонстрировали замечательную способность извлечения ценных сведений из медицинских изображений [1].

Модели глубокого обучения, подготовленные на больших наборах данных, распознают сложные закономерности и особенности, которые не так просто различить человеческому глазу [2, 3]. Такие алгоритмы могут даже открыть новую перспективу относительно того, какие особенности изображения следует учитывать для поддержки принятия решений [4].

Одним из ключевых преимуществ ИИ в медицинской визуализации является его способность повышать точность и эффективность диагностики заболеваний [1, 5]. Благодаря этому ИИ может помогать диагностам в обнаружении аномалий, идентификации конкретных структур, а также в прогнозировании результатов лечения [5, 6].

Используя алгоритмы машинного обучения, системы ИИ анализируют медицинские изображения с высокой скоростью и точностью, позволяя выявлять на ранней стадии заболевания, которые трудно обнаружить традиционными методами диагностики. Раннее определение имеющейся патологии критически важно в современной клинической медицине, поскольку способствует проведению своевременного лечебного вмешательства, в ряде случаев потенциально спасая жизни пациентов и улучшая результаты специального лечения [1–3].

Более того, ИИ открыл новые возможности в сегментации и количественной оценке получаемых изображений. Используя сложные алгоритмы, он может точно очерчивать интересующие структуры, такие как опухоли, кровеносные сосуды или даже клетки [7–9]. Возможность сегментации бесценна при планировании специального лечения у онкологических больных, поскольку позволяет клиницистам точно определять анатомические области для прецизионного проведения, в частности, радиотерапии, то есть реализовывать целенаправленное специальное высокотехнологичное противоопухолевое лечение [10].

Весьма важным обстоятельством является то, что интеграция ИИ и медицинской визуализации способствовала развитию именно персонализированной медицины. Благодаря анализу медицинских изображений и индивидуальных данных пациентов алгоритмы ИИ могут генерировать наиболее адекватные для конкретного больного варианты специального лечения, позволяя разрабатывать индивидуальные планы терапевтического воздействия,

учитывающие анатомо-физиологические особенности пациента и характеристики выявленного заболевания. Такой подход в медицинской практике повышает эффективность лечения и сводит к минимуму риск развития побочных эффектов, что в конечном итоге приводит к улучшению результатов лечения и качества жизни пациентов [1, 11, 12].

Что касается операционного этапа специального лечения, ИИ способствовал внедрению хирургических процедур с визуальным контролем. Объединяя данные предоперационной визуализации с визуализацией в режиме реального времени во время операции, алгоритмы ИИ могут предоставить хирургам расширенную помощь в навигации и поддержке принятия решений. Это повышает точность вмешательств, снижает процедурные риски и позволяет использовать при возможности минимально инвазивные методы, приводя к снижению до приемлемого минимума риски причинения пациентам неоправданного ущерба в связи с хирургической операцией [13].

Анализ медицинских изображений для диагностики заболеваний / Medical image analysis for disease diagnosis

В настоящее время ИИ применяется в медицинской визуализации, способствуя точности диагностики, а также эффективности лечения и мониторинга за состоянием пациентов после него [14–16]. Анализ изображений для выявления различных заболеваний представляет собой быстро развивающуюся область, обладающую огромным потенциалом для повышения эффективности системы здравоохранения. Используя передовые вычислительные методы и алгоритмы машинного обучения, медицинские работники теперь могут извлекать важную дополнительную информацию из разнообразных визуализационных методов диагностики всевозможных нозологических форм заболеваний человека [17, 18].

Сердечно-сосудистые заболевания

За последние годы ИИ значительно улучшил сердечно-сосудистую визуализацию, облегчив обнаружение и количественную оценку заболеваний сердца, комплексный анализ сосудистых аномалий и интеграцию данных мультимодальной визуализации. Алгоритмы ИИ могут эффективно интерпретировать сложные данные, распознавая начальные стадии таких патологий, как ишемическая болезнь сердца и застойная сердечная недостаточность, с помощью КТ, МРТ или эхокардиографии. Например, модели машинного обучения и сверточные нейронные сети продемонстрировали способность автоматически обнаруживать кальцификацию коронарных артерий и выполнять сегментацию миокарда левого желудочка [19, 20].

Измерение различных структур сердца помогает выявить риск развития сердечно-сосудистых заболеваний у человека или установить проблемы, которые, возможно, необходимо решить с помощью хирургического вмешательства или адекватной медикаментозной терапии. Инструменты ИИ можно использовать для автоматизации таких измерительных задач, как, например, анализ состояния аортального клапана, измерение угла карины и диаметра легочной артерии. Применение ИИ в анализе получаемых визуализационных данных также помогает выявить утолщение определенных мышечных структур, таких как стенка левого желудочка, или отследить изменения кровотока через сердце и связанные с ним артерии. Например, автоматизированная количественная оценка кровотока в легочной артерии сэкономит время врача, интерпретирующего результаты, за счет исключения ручных измерений, предотвратит ошибки обнаружения и предоставит структурированные количественные данные, которые можно будет использовать в последующих исследованиях. Кроме того, ИИ демонстрирует значительные перспективы в кардиологии, особенно в интерпретации электрокардиограмм и эхокардиограмм. Сложные алгоритмы машинного обучения обнаруживают разнообразные сердечные паттерны и аномалии, точно предсказывая такие состояния, как мерцательная аритмия и инфаркт миокарда [21].

Помимо этого, ИИ способен в целом диагностировать сердечно-сосудистые заболевания. Так, используя классификатор нейронной сети, застойную сердечную недостаточность можно обнаружить даже на рентгенограммах грудной клетки. Исследование J.C.Y. Seah et al. показало впечатляющий результат: авторы применили генеративную состязательную сеть (алгоритм машинного обучения без учителя) для получения прямой визуализации характеристик, что позволило выделить на рентгенограммах грудной клетки соответствующие аберрантные признаки, характерные для застойной сердечной недостаточности [22].

Более того, крупным прорывом в сердечно-сосудистой визуализации на основе ИИ является интеграция данных мультимодальной визуализации, которая объединяет информацию из КТ, МРТ и эхокардиографии для обеспечения целостного представления структуры и функции сердца. Эти консолидированные данные необходимы для сложных оценок, таких как обнаружение ишемии или планирование инвазивных вмешательств. Например, алгоритмы машинного обучения могут объединять данные перфузии из МРТ с коронарной анатомией из КТ, создавая сложные трехмерные модели сердца, что улучшает обнаружение сердечной ишемии и облегчает точное планирование возможных лечебных процедур [23, 24].

Скрининг на наличие некоторых видов злокачественных опухолей

Онкологический диагноз всегда является неожиданным, в некотором роде роковым известием для любого пациента. Однако, несмотря на это печальное обстоятельство, точная диагностика может помочь людям более четко понять вероятные результаты проведенного исследования и возможные отдаленные последствия предлагаемого специального лечения, а также спланировать свой вероятный уход из жизни с исполнением каких-либо желаний в конце жизненного пути. Медицинские изображения широко используются при плановых профилактических обследованиях (скрининге) таких онкологических патологий, как рак легких [25, 26], рак молочной железы [27–30], а также рак толстой кишки и почечно-клеточный рак.

Так, исключительные возможности ИИ в извлечении информации об изображениях и обработке сложных моделей, в частности сверточных нейронных сетей, привели к признанию его применения в скрининге рака легких, включая сегментацию легких, обнаружение метастатических узлов и их классификацию, а также уменьшение ложноположительных результатов и прогнозирование исходов специального лечения [31].

Следует подчеркнуть, что среди многочисленных онкологических заболеваний злокачественные новообразования легких являются одним из самых распространенных видов опухолей, отличающимся агрессивным течением и высоким уровнем летальности, что ставит его в ряд ключевых проблем современного здравоохранения. Наибольшие шансы положительного исхода специального лечения рака легких дает только выявление болезни на ранних стадиях, в связи с чем во многих странах мира осуществляются программы скрининга, основанные, в первую очередь, на применении низкодозовой компьютерной томографии (НДКТ). Их эффективность в ходе рандомизированных исследований подтверждается достоверным снижением летальности в группе пациентов, которым в процессе диагностических исследований НДКТ постоянно проводилась после среднего периода наблюдения 6,5 года [32–36].

В рамках программы скрининга рака легкого в свое время в г. Москве отечественными исследователями была проведена независимая оценка диагностической точности алгоритма ИИ для выявления очагов поражения на НДКТ. В целом высокие показатели точности, полученные при независимом тестировании, свидетельствовали о хорошей воспроизводимости результатов работы ИИ на независимых данных, относящихся к популяции г. Москвы [37].

Что касается рака молочной железы, то при наличии микрокальцинатов весьма трудно окончательно определить соответствующую ткань молочной железы как злокачественную или доброкачественную. В этом случае ложноположительные результаты часто приводят к ненужному инвазивному тестированию или даже хирургическому лечению, а при пропущенном злокачественном процессе – к весьма неблагоприятному результату. Визуализация молочной железы сыграла ключевую роль в раннем выявлении рака молочной железы и снижении смертности от него. Внедрение таких методов, как маммография, значительно улучшило показатели первоначального диагностирования опухоли, точности сегментации и характеристики раковых поражений, а также мониторинг ответа на специальное противоопухолевое лечение и последующее наблюдение за пациентами [27, 38].

Аналогичным образом пациенты, проходящие скрининг на колоректальный рак, могут попасть в ситуацию, если во время плановых проверок будут обнаружены полипы, являющиеся предшественниками развития злокачественного процесса. КТ-колонография обеспечивает минимально инвазивное структурное обследование толстой и прямой кишок для выявления клинически значимых полипов. Однако неопытные рентгенологи могут пропустить наличие полипов, и тогда именно ИИ реально помогает повысить точность и эффективность их обнаружения, сократить число ложноположительных результатов и в конечном итоге снизить так называемый медицинский юридический риск для врача-рентгенолога. Кроме того, в сфере выявления, например, опухолей почек, модели ИИ продемонстрировали точность в интерпретации изображений, превосходящую человеческую. Это способствует применению более эффективных стратегий специального лечения, что потенциально приводит к улучшению результатов лечения этой категории онкоурологических пациентов [39].

По мнению онкологического сообщества, ИИ может быть также весьма полезен при специальном противоопухолевом лечении злокачественных опухолей головы и шеи, рака предстательной железы и шейки матки, а также ряда других злокачественных новообразований [40, 41].

Неврологические заболевания

Дегенеративные неврологические заболевания, например боковой амиотрофический склероз и многие другие похожие патологические процессы в нервной системе, могут казаться пациентам неотвратимыми инвалидизирующими диагнозами, от которых в настоящее время не существует реального патогенетического лечения. Их выявление основано на визуализационных исследова-

ниях, поэтому рентгенологи должны решить, являются ли поражения релевантными или просто имитируют структуры одного из других похожих заболеваний, особенно учитывая то обстоятельство, что ложноположительные результаты встречаются в данной клинической ситуации достаточно часто.

Быстро расширяющееся применение машинного обучения оказалось незаменимым и в области нейрорадиологии. Эта передовая технология способствовала, в частности, раннему выявлению различных подтипов инсульта, о чем свидетельствует исследование, проведенное V.S. Yedavalli et al. [42]. Сверточные нейронные сети демонстрируют великолепный анализ визуализационных изображений, включая обнаружение инфарктов головного мозга или кровоизлияний, сегментацию, классификацию и идентификацию окклюзии крупных сосудов, а также оказывают существенное влияние на адекватный подход к лечению инсульта, что, например, довольно убедительно показано в исследовании J.E. Souin et al. [43].

Кроме того, ИИ играет важную роль в раннем выявлении нейродегенеративных расстройств, особенно таких состояний, как болезнь Альцгеймера и Паркинсона. Разработаны сложные алгоритмы ИИ для анализа изображений МРТ с целью обнаружения специфических биомаркеров или характерных закономерностей, связанных с этими состояниями.

В целом задача распознавания тонких изменений в структуре или функции головного мозга, которая имеет решающее значение для диагностики нейроонкологических заболеваний, более эффективно решается с применением ИИ благодаря его способности обнаруживать уточненные закономерности на уровне вокселей и предоставлять объективные количественные оценки этих изменений [44, 45].

Переломы и другие травмы опорно-двигательного аппарата

Переломы и травмы опорно-двигательного аппарата могут привести к длительной хронической боли, а иногда и к инвалидизации пациента, если их своевременно и правильно не подвергать специальному лечению. Такие травматические повреждения, как перелом шейки бедра у пожилых пациентов, сопряжены с неблагоприятными общими исходами из-за снижения подвижности и связанных с этим возможных госпитализаций. Использование ИИ для выявления труднообнаружаемых переломов, вывихов или повреждений мягких тканей может позволить хирургам и специалистам быть более уверенными в выборе специального лечения в данной клинической ситуации [46].

Следует подчеркнуть, что после какой-либо травмы переломы часто считаются в некоторой

мере второстепенными по значимости в сравнении с возможным внутренним кровотечением или непосредственным травматическим повреждением органов. Когда специалисты по диагностике, рассматривающие визуализационную информацию, связанную с травмой, в первую очередь сосредотачиваются, например, на опасном для жизни пациента массивном посттравматическом кровотечении, переломы могут быть упущены из виду, и в этой ситуации именно ИИ может обеспечить непосредственную констатацию данного патологического состояния [47].

Кроме того, ИИ обеспечивает полезную подстраховку при проведении плановых осмотров, в частности после распространенных операций на бедре (например, эндопротезирования тазобедренного сустава), с точки зрения выявления возможного прогрессирования какой-либо аномалии в состоянии искусственного импланта [48].

Модели ИИ продемонстрировали сопоставимые со специалистами-рентгенологами результаты в обнаружении дегенеративных изменений пояснично-крестцового отдела позвоночника. Последовательное совершенствование моделей сверточной нейронной сети на основе сравнительной оценки с результатами работы врачей-рентгенологов повышает чувствительность и специфичность выявления патологических изменений [49, 50].

Торакальные (пульмонологические) осложнения и состояния

Пневмония и пневмоторакс иногда являются опасными для жизни критическими состояниями, требующими быстрой реакции со стороны клиницистов. Они могут быть своевременно распознаны с помощью алгоритмов ИИ. Для диагностики пневмонии часто используются визуализационные изображения, однако у рентгенологов могут возникнуть трудности с диагностикой пневмонии, особенно если у пациента уже есть сопутствующие заболевания легких, такие как злокачественные новообразования или муковисцидоз.

Кроме того, «незаметные» пневмонии, например те, которые локализируются ниже купола диафрагмы, на прямых передних рентгенограммах грудной клетки легко пропустить, что приведет к назначению ненужного КТ-сканирования, сопровождающегося определенной лучевой нагрузкой на пациента. С помощью ИИ можно оценить имеющиеся рентгеновские снимки и другую визуализационную информацию, касающуюся наличия затемнений в легких и указывающую на возможную пневмонию, и ориентировать врачей на другие вероятные потенциальные диагнозы, способствуя тем самым ускорению начала адекватного специфического лечения.

Аналогичным образом ИИ может помочь клиницистам выявить пациентов с подозрением на пневмоторакс с высоким риском его развития в результате каких-либо травм или инвазивных вмешательств, особенно в отсутствие рентгенологов. Применение ИИ позволит определить приоритетность типа и тяжести пневмоторакса, что изменит срочность и специфичность проводимого лечения, а также осуществлять мониторинг состояния пациентов при динамическом наблюдении [51, 52].

Заболевания брюшной полости и таза

В области гастроэнтерологии для оценки состояния пищеварительного тракта используется несколько методов визуализации, к которым относятся рентгенология, эндоскопия и гистологические срезы образцов тканей. При автоматическом анализе изображений желудочно-кишечного тракта в основном применяется подтип ИИ, называемый машинным обучением, хотя могут помочь и другие ветви ИИ, например обработка естественного языка.

В целом ИИ способствовал беспрецедентному прогрессу в диагностике заболеваний брюшной полости и таза, особенно в области визуализации желудочно-кишечного тракта. При этом его вклад имел решающее значение в улучшении диагностики и стадирования, в первую очередь, заболеваний печени и поджелудочной железы. Концептуализация различных прогностических моделей на основе ИИ расширила диагностический спектр патологических процессов, локализующихся в брюшной и тазовой полостях, охватив желудочно-кишечные и воспалительные заболевания, незлокачественные состояния и обнаружение кишечного кровотечения с использованием передовых технологий, таких как беспроводная капсульная эндоскопия [53].

Таким образом, ИИ изменил визуализацию брюшной полости и таза благодаря своей способности предоставлять точные и воспроизводимые данные. Технологии ИИ облегчают автоматическую или полуавтоматическую сегментацию и регистрацию органов, в том числе печени и поджелудочной железы, а также связанных с ними поражений, тем самым повышая точность диагностики и эффективность лечения [54, 55].

В то же время интеграция радиомики вводит новые количественные показатели в анализ радиологических данных, тем самым обогащая обнаружение и характеристику очаговых поражений и диффузных заболеваний желудочно-кишечного тракта. Это приводит к потенциальному повышению эффективности клинических результатов патогенетического лечения выявленных патологических состояний [56].

ИИ и персонализированная медицина / AI and personalized medicine

Несомненно, интеграция ИИ и медицинской визуализации способствовала развитию персонализированной медицины. Посредством анализа медицинских изображений и данных конкретного пациента алгоритмы ИИ могут генерировать информацию, специфичную для каждого больного, позволяя разрабатывать планы специального лечения, учитывающие индивидуальные различия в анатомических и физиологических особенностях, а также в специфических характеристиках различных заболеваний. Это повышает эффективность лечения и сводит к минимуму риск вероятного развития побочных эффектов, что в конечном итоге приводит к улучшению результатов лечения и улучшению качества жизни пациентов [1, 11].

Персонализированное лечение (также известное как точная, или персонализированная медицина) представляет собой подход, который адаптирует медицинскую помощь к отдельным пациентам на основе их уникальных персональных характеристик, таких как генетика, окружающая среда, образ жизни и биомаркеры. Таким образом, по мнению ряда авторов, персонализированное лечение представляет собой новаторскую область, демонстрирующую потенциал точной медицины в больших масштабах [1, 57].

В целом такой индивидуализированный подход направлен на улучшение результатов лечения путем проведения целевых вмешательств, которые являются более эффективными, действенными и безопасными. ИИ становится ценным инструментом продвижения персонализированного лечения, предлагая значимый потенциал для анализа сложных наборов данных, прогнозирования результатов и оптимизации стратегий специального лечения различных заболеваний человека [58].

Таким образом, можно вполне определенно утверждать, что алгоритмы на базе ИИ могут анализировать огромные объемы медицинских данных, помогая врачам в режиме реального времени, в том числе и во время хирургических процедур, предоставляя им дополнительную ценную информацию и обеспечивая проведение персонализированных лечебных мероприятий.

Перспективы / Prospects

ИИ прошел долгий путь от своих истоков до современного состояния, и его развитие продолжает открывать новые горизонты для всего человечества.

Сочетание медицинской визуализации и ИИ привело к значительным достижениям в здравоохранении, характеризующимся как ранним диагностическим выявлением различных заболева-

ний, так и успешной реализацией их специального лечения путем персонализированных терапевтических решений. Это произвело своего рода революцию в медицинской практике. Реализуя возможности ИИ, врачи могут использовать огромное количество информации, содержащейся в медицинских изображениях, для постановки точного диагноза, адаптации планов персонализированного лечения и повышения эффективности его конечных результатов.

Поскольку технологии ИИ продолжают развиваться, возможно скорейшее появление еще большего количества революционных инноваций в виде новых математических моделей и алгоритмов, которые в ближайшие годы могут значительно изменить ландшафт применения медицинской визуализации и ИИ.

Хотя ожидается, что ИИ окажет существенное влияние на диагностический процесс, он вряд ли полностью заменит потребность в рентгенологах. Специалисты по визуализации получают помощь в виде автоматизации многих ранее ручных задач, связанных с предварительным обследованием, позиционированием пациента, выбором протокола визуализации, получением изображений и его оценкой, последующей окончательной обработкой и даже обслуживанием диагностического оборудования. В этом контексте рентгенологи и врачи-клиницисты должны знакомиться с новыми современными медицинскими технологиями и демонстрировать готовность активно участвовать в их разработке, внедрении и принятии решений на основе ИИ. Однако для специалистов крайне важно безопасно (в первую очередь, для пациента) извлекать выгоду из ИИ с помощью практических навыков, основанных на фактических данных и постоянном этическом надзоре.

В перспективе планируется, что ИИ будет использоваться для расширения возможностей рентгенологов, а не для их замены. Алгоритмы ИИ могут использоваться для помощи в интерпретации медицинских изображений и предлагать возможные варианты соответствующих клинических диагнозов. Но рентгенологу по-прежнему придется просматривать и интерпретировать изображения, а также самому ставить окончательный диагноз.

Заключение / Conclusion

Термин «искусственный интеллект» относится к способности современных технологий, в основном компьютеров, имитировать человеческий интеллект, в результате чего медицинская сфера может получить весьма большую выгоду от ее практической реализации. Одной из ключевых областей применения ИИ в медицинской

визуализации является анализ медицинских изображений, таких как рентгеновские снимки, КТ и МРТ.

Несомненно, что в будущем рентгенологи будут играть важную роль в системе здравоохранения, работая вместе с ИИ. Совместный диагности-

ческий процесс гарантирует наиболее адекватный подход, способствующий выработке оптимального плана патогенетического лечения и, таким образом, обеспечивающий достижение наилучших результатов при его дальнейшей индивидуальной специализированной реализации.

Литература [References]

- Ghaffar Nia N, Kaplanoglu E, Nasab A. Evaluation of artificial intelligence techniques in disease diagnosis and prediction. *Discov Artif Intell*. 2023; 3: 5. <https://doi.org/10.1007/s44163-023-00049-5>.
- Kumar Y, Koul A, Singla R, Ijaz MF. Artificial intelligence in disease diagnosis: a systematic literature review, synthesizing framework and future research agenda. *J Ambient Intell Humaniz Comput*. 2022; 14(7): 8459–86. <https://doi.org/10.1007/s12652-021-03612-z>.
- Hosny A., Parmar C., Quackenbush J., et al. Artificial intelligence in radiology. *Nat Rev Cancer*. 2018; 18(8): 500–10. <https://doi.org/10.1038/s41568-018-0016-5>.
- Waldstein SM, Seeböck P, Donner R, et al. Unbiased identification of novel subclinical imaging biomarkers using unsupervised deep learning. *Sci Rep*. 2020; 10: 12954. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69814-1>.
- Plested J, Gedeon T. Deep transfer learning for image classification: an overview. *arXiv:2205.09904*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2205.09904>.
- Alowais SA, Alghamdi SS, Alsuhebany N, et al. Revolutionizing healthcare: the role of artificial intelligence in clinical practice. *BMC Med Educ*. 2023; 23(1): 689. <https://doi.org/10.1186/s12909-023-04698-z>.
- Sinha A, Dolz J. Multi-scale self-guided attention for medical image segmentation. *IEEE J Biomed Health Inform*. 2021; 25(1): 121–30. <https://doi.org/10.1109/JBHI.2020.2986926>.
- Popescu D, Stanciulescu A, Pomohaci MD, Ichim L. Decision support system for liver lesion segmentation based on advanced convolutional neural network architectures. *Bioengineering*. 2022; 9(9): 467. <https://doi.org/10.3390/bioengineering9090467>.
- Altini N, Brunetti A, Puro E, et al. NDG-CAM: nuclei detection in histopathology images with semantic segmentation networks and grad-CAM. *Bioengineering*. 2022; 9(9): 475. <https://doi.org/10.3390/bioengineering9090475>.
- van de Sande D, Sharabiani M, Bluemink H, et al. Artificial intelligence based treatment planning of radiotherapy for locally advanced breast cancer. *Phys Imaging Radiat Oncol*. 2021; 20: 111–6. <https://doi.org/10.1016/j.phro.2021.11.007>.
- Schork NJ. Artificial intelligence and personalized medicine. *Cancer Treat Res*. 2019; 178: 265–83. https://doi.org/10.1007/978-3-030-16391-4_11.
- Uddin M, Wang Y, Woodbury-Smith M. Artificial intelligence for precision medicine in neurodevelopmental disorders. *NPJ Digit Med*. 2019; 2: 112. <https://doi.org/10.1038/s41746-019-0191-0>.
- Hashimoto DA, Rosman G, Rus D, Meireles OR. Artificial intelligence in surgery: promises and perils. *Ann Surg*. 2018; 268(1): 70–6. <https://doi.org/10.1097/SLA.0000000000002693>.
- Lee W, Shin H., Chang MC. Deep learning algorithm to evaluate cervical spondylotic myelopathy using lateral cervical spine radiograph. *BMC Neurol*. 2022; 22(1): 147. <https://doi.org/10.1186/s12883-022-02670-w>.
- Xu JH, Zhou XM, Ma JL, et al. Application of convolutional neural network to risk evaluation of positive circumferential resection margin of rectal cancer by magnetic resonance imaging. *Zhonghua Wei Chang Wai Ke Za Zhi*. 2020; 23(6): 572–7 (in Chinese). <https://doi.org/10.3760/cma.j.cn.441530-20191023-00460>.
- Obuchowicz R, Strzelecki M, Piórkowski A. Clinical applications of artificial intelligence in medical imaging and image processing – a review. *Cancers*. 2024; 16(10): 1870. <https://doi.org/10.3390/cancers16101870>.
- Barragán-Montero A, Javai U, Valdés G, et al. Artificial intelligence and machine learning for medical imaging: a technology review. *Phys Med*. 2021; 83: 242–56. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2021.04.016>.
- Khalifa M, Albadawy M. Artificial Intelligence for clinical prediction: exploring key domains and essential functions. *Comput Methods Programs Biomed Update*. 2024; 5: 100148. <https://doi.org/10.1016/j.cmpbup.2024.100148>.
- Lee GW, Shin H, Chang MC. Deep learning algorithm to evaluate cervical spondylotic myelopathy using lateral cervical spine radiograph. *BMC Neurol*. 2022; 22(1): 147. <https://doi.org/10.1186/s12883-022-02670-w>.
- Abdelrahman K, Shiyovich A, Huck DM, et al. Artificial intelligence in coronary artery calcium scoring detection and quantification. *Diagnostics*. 2024; 14(2): 125. <https://doi.org/10.3390/diagnostics14020125>.
- Muzammil MA, Javid S, Afridi AK, et al. Artificial intelligence-enhanced electrocardiography for accurate diagnosis and management of cardiovascular diseases. *J Electrocardiol*. 2024; 83: 30–40. <https://doi.org/10.1016/j.jelectrocard.2024.01.006>.
- Seah JCY, Tang JSN, Kitchen A, et al. Chest radiographs in congestive heart failure: visualizing neural network learning. *Radiology*. 2019; 290(2): 514–22. <https://doi.org/10.1148/radiol.2018180887>.
- Reza-Soltani S, Fakhare Alam L, Debellotte O, et al. The role of artificial intelligence and machine learning in cardiovascular imaging and diagnosis. *Cureus*. 2024; 16(9): e68472. <https://doi.org/10.7759/cureus.68472>.
- Pezel T, Toupin S, Bousson V, et al. A machine learning model using cardiac CT and MRI data predicts cardiovascular events in obstructive coronary artery disease. *Radiology*. 2025; 314(1): e233030. <https://doi.org/10.1148/radiol.233030>.
- Леденев В.В., Солodкий В.А., Нуднов Н.В., Сотников В.М. Количественные характеристики лучевого повреждения легочной ткани у онкологических пациентов при лучевой терапии на основании данных PKT. Медицинская визуализация. 2022; 26(4): 60–74. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1182>. [Ledenev VV, Solodkiy VA, Nudnov NV, Sotnikov VM. Quantitative characteristics of radiation-induced lung damage in oncological patients during radiotherapy based on RCT

- data. *Medical Visualization*. 2022; 26(4): 60–74 (in Russ). <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1182>.]
26. Морозов С.П., Владзимирский А.В., Гомболевский В.А. и др. Искусственный интеллект в скрининге рака легкого: оценка диагностической точности алгоритма для анализа низкодозовых компьютерных томографий. *Туберкулез и болезни легких*. 2020; 98(8): 24–31. <https://doi.org/10.21292/2075-1230-2020-98-8-24-31>. [Morozov SP, Vladzimirskiy AV, Gombolevskiy VA, et al. Artificial intelligence in lung cancer screening: assessment of the diagnostic accuracy of the algorithm analyzing low-dose computed tomography. *Tuberculosis and Lung Diseases*. 2020; 98(8): 24–31 (in Russ). <https://doi.org/10.21292/2075-1230-2020-98-8-24-31>.]
 27. Рожкова Н.И. Технологии искусственного интеллекта и системной биологии в онкомаммоскрининге. URL: <https://rusmammo.ru/tehnologii-iskusstvennogo-intellekta-i-sistemnoj-biologii-v-onkomammoskrininge-rozhkova-nadezhda-ivanovna/> (дата обращения 12.09.2024). [Rozhkova NI. Artificial intelligence and systemic biology technologies in oncomammoscreening. Available at: <https://rusmammo.ru/tehnologii-iskusstvennogo-intellekta-i-sistemnoj-biologii-v-onkomammoskrininge-rozhkova-nadezhda-ivanovna/> (in Russ) (accessed 12.09.2024).]
 28. Солодкий В.А., Каприн А.Д., Нуднов Н.В. и др. Искусственный интеллект в скрининге рака молочной железы (литературный обзор). URL: http://vestnik.rncrr.ru/vestnik/v22/docs/solodkiy_t4.pdf (дата обращения 12.09.2024). [Solodky VA, Kaprin AD, Nudnov NV, et al. Artificial intelligence in breast cancer screening (literature review). Available at: http://vestnik.rncrr.ru/vestnik/v22/docs/solodkiy_t4.pdf (in Russ) (accessed 12.09.2024).]
 29. Солодкий В.А., Каприн А.Д., Нуднов Н.В. и др. Современные системы поддержки принятия врачебных решений на базе искусственного интеллекта для анализа цифровых маммографических изображений. *Вестник рентгенологии и радиологии*. 2023; 104(2): 151–62. <https://doi.org/10.20862/0042-4676-2023-104-2-151-162>. [Solodkiy VA, Kaprin AD, Nudnov NV, et al. Contemporary medical decision support systems based on artificial intelligence for the analysis of digital mammographic images. *Journal of Radiology and Nuclear Medicine*. 2023; 104(2): 151–62 (in Russ). <https://doi.org/10.20862/0042-4676-2023-104-2-151-162>.]
 30. Солодкий В.А., Каприн А.Д., Нуднов Н.В. и др. Возможности искусственного интеллекта в оценке риска рака молочной железы на маммографических изображениях (клинические примеры). *Вестник Российского научного центра рентгено-радиологии*. 2023; 23(1): 24–31. [Solodkiy VA, Kaprin AD, Nudnov NV, et al. The possibilities of artificial intelligence in breast cancer risk assessment on mammographic images (clinical examples). *Vestnik of the Russian Scientific Center of Roentgenoradiology*. 2023; 23(1): 24–31 (in Russ).]
 31. Quanyang W, Yao H, Sicong W, et al. Artificial intelligence in lung cancer screening: detection, classification, prediction, and prognosis. *Cancer Med*. 2024; 13(7): e7140. <https://doi.org/10.1002/cam4.7140>.
 32. de Koning HJ, van der Aalst CM, de Jong PA, et al. Reduced lung-cancer mortality with volume CT screening in a randomized trial. *N Engl J Med*. 2020; 382(6): 503–13. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1911793>.
 33. Huang KL, Wang SY, Lu WC, et al. Effects of low-dose computed tomography on lung cancer screening: a systematic review, meta-analysis, and trial sequential analysis. *BMC Pulm Med*. 2019; 19(1): 126. <https://doi.org/10.1186/s12890-019-0883-x>.
 34. National Lung Screening Trial Research Team. Lung cancer incidence and mortality with extended follow-up in the National Lung Screening Trial. *J Thorac Oncol*. 2019; 14(10): 1732–42. <https://doi.org/10.1016/j.jtho.2019.05.044>.
 35. Pastorino U, Sverzellati N, Sestini S, et al. Ten-year results of the multicentric Italian lung detection trial demonstrate the safety and efficacy of biennial lung cancer screening. *Eur J Cancer*. 2019; 118: 142–8. <https://doi.org/10.1016/j.ejca.2019.06.009>.
 36. Polat G, Halici U, Dogrusoz YS. False positive reduction in lung computed tomography images using convolutional neural networks. *arXiv:1811.01424*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1811.01424>.
 37. Морозов С.П., Владзимирский А.В., Гомболевский В.А. и др. Искусственный интеллект в скрининге рака легкого: оценка диагностической точности алгоритма для анализа низкодозовых компьютерных томографий. *Туберкулез и болезни легких*. 2020; 98(8): 24–31. <https://doi.org/10.21292/2075-1230-2020-98-8-24-31>. [Morozov SP, Vladzimirskiy AV, Gombolevskiy VA, et al. Artificial intelligence in lung cancer screening: assessment of the diagnostic accuracy of the algorithm analyzing low-dose computed tomography. *Tuberculosis and Lung Diseases*. 2020; 98(8): 24–31 (in Russ). <https://doi.org/10.21292/2075-1230-2020-98-8-24-31>.]
 38. WHO position paper on mammography screening. Available at: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241507936> (accessed 12.09.2024).
 39. Wang Z, Zhang X, Wang X, et al. Deep learning techniques for imaging diagnosis of renal cell carcinoma: current and emerging trends. *Front Oncol*. 2023; 13: 1152622. <https://doi.org/10.3389/fonc.2023.1152622>.
 40. Luchini C, Pea A, Scarpa A. Artificial intelligence in oncology: current applications and future perspectives. *Br J Cancer*. 2022; 126(1): 4–9. <https://doi.org/10.1038/s41416-021-01633-1>.
 41. Koh DM, Papanikolaou N, Bick U, et al. Artificial intelligence and machine learning in cancer imaging. *Commun Med*. 2022; 2: 133. <https://doi.org/10.1038/s43856-022-00199-0>.
 42. Yedavalli VS, Tong E, Martin D, et al. Artificial intelligence in stroke imaging: current and future perspectives. *Clin Imaging*. 2021; 69: 246–54. <https://doi.org/10.1016/j.clinimag.2020.09.005>.
 43. Soun JE, Chow DS, Nagamine M, et al. Artificial intelligence and acute stroke imaging. *AJNR Am J Neuroradiol*. 2021; 42(1): 2–11. <https://doi.org/10.3174/ajnr.A6883>.
 44. Lui YW, Chang PD, Zaharchuk G, et al. Artificial intelligence in neuroradiology: current status and future directions. *AJNR Am J Neuroradiol*. 2020; 41(8): E52–9. <https://doi.org/10.3174/ajnr.A6681>.
 45. Регентова О.С., Солодкий В.А., Боженко В.К. и др. Радиомический анализ данных в нейроонкологии. *Вестник Российского научного центра рентгено-радиологии*. 2024; 24(2): 69–77. [Regentova OS, Solodkiy VA, Bozhenko VK, et al. Radiomic data analysis in neurooncology. *Vestnik of the Russian Scientific Center of Roentgenoradiology*. 2024; 24(2): 69–77 (in Russ).]
 46. Hussain A, Fareed A, Taseen S. Bone fracture detection—Can artificial intelligence replace doctors in orthopedic radiography analysis? *Front Artif Intell*. 2023; 6: 1223909. <https://doi.org/10.3389/frai.2023.1223909>.

47. Dell'Aria A, Tack D, Saddiki N, et al. Radiographic detection of post-traumatic bone fractures: contribution of artificial intelligence software to the analysis of senior and junior radiologists. *J Belg Soc Radiol*. 2024; 108(1): 44. <https://doi.org/10.5334/jbsr.3574>.
48. Gurung B, Liu P, Harris PDR, et al. Artificial intelligence for image analysis in total hip and total knee arthroplasty: a scoping review. *Bone Joint J*. 2022; 104-B(8): 929–37. <https://doi.org/10.1302/0301-620X.104B8.BJJ-2022-0120.R2>.
49. Нуднов Н.В., Коробов А.В., Скачков А.А. и др. Оценка качества работы искусственного интеллекта в выявлении дегенеративных заболеваний пояснично-крестцового отдела позвоночника. *Вестник рентгенологии и радиологии*. 2024; 105(1): 20–8. <https://doi.org/10.20862/0042-4676-2024-105-1-20-28>. [Nudnov NB, Korobov AV, Skachkov AA, et al. Evaluation of artificial intelligence effectiveness in detection of lumbosacral spine degenerative diseases. *Journal of Radiology and Nuclear Medicine*. 2024; 105(1): 20–8 (in Russ). <https://doi.org/10.20862/0042-4676-2024-105-1-20-28>.]
50. Русаков А.С., Тумко В.В., Сарбаев Р.С. и др. Модель нейронной сети для выявления и классификации стенозов пояснично-крестцового отдела позвоночника на МР-томограммах. *Медицинская визуализация*. 2025; 29(1): 102–12. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1436>. [Rusakov AS, Tumko VV, Sarbaev RS, et al. A neural network model for detection and classification of central lumbosacral spinal stenosis on MRI scans. *Medical Visualization*. 2025; 29(1): 102–12 (in Russ). <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1436>.]
51. Kim D, Lee JH, Kim SW, et al. Quantitative measurement of pneumothorax using artificial intelligence management model and clinical application. *Diagnostics*. 2022; 12(8): 1823. <https://doi.org/10.3390/diagnostics12081823>.
52. Hunter JG, Pierce JD, Gilkeson RC, et al. clinical implementation of an artificial intelligence tool in the detection and management of pneumothoraces in patients with COVID-19. *Cureus*. 2023; 15(7): e42509. <https://doi.org/10.7759/cureus.42509>.
53. Mascarenhas Saraiva M, Ribeiro T, Afonso J, et al. Artificial intelligence and capsule endoscopy: automatic detection of small bowel blood content using a convolutional neural network. *GE Port J Gastroenterol*. 2021; 29(5): 331–8. <https://doi.org/10.1159/000518901>.
54. Kumar R, Kang FU, Sharma A, et al. Modern applications of artificial intelligence in the detection of diseases of the gastrointestinal tract, liver and pancreas. *Curr Med Chem*. 2022; 29(1): 66–85. <https://doi.org/10.2174/0929867328666210405114938>.
55. Cardobi N, Dal Palù A, Pedrini F, et al. An overview of artificial intelligence applications in liver and pancreatic imaging. *Cancers*. 2021; 13(9): 2162. <https://doi.org/10.3390/cancers13092162>.
56. Johnson KB, Wei WQ, Weeraratne D, et al. Precision medicine, AI, and the future of personalized health care. *Clin Transl Sci*. 2021; 14(1): 86–93. <https://doi.org/10.1111/cts.12884>.
57. Quazi S. Artificial intelligence and machine learning in precision and genomic medicine. *Med Oncol*. 2022; 39(8): 120. <https://doi.org/10.1007/s12032-022-01711-1>.
58. Evans W, Meslin EM, Kai J, Qureshi N. Precision medicine—are we there yet? A narrative review of precision medicine's applicability in primary care. *J Pers Med*. 2024; 14(4): 418. <https://doi.org/10.3390/jpm14040418>.



Текстурный анализ КТ-изображений в дифференциальной диагностике немелкоклеточного рака легкого

Воробьева В.О.¹, Тюрин И.Е.^{1,2}

¹ ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр онкологии им. Н.Н. Блохина» Минздрава России, Каширское ш., 23, Москва, 115522, Российская Федерация

² ФГБОУ ДПО «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования» Минздрава России, ул. Баррикадная, 2/1, стр. 1, Москва, 125993, Российская Федерация

Воробьева Валентина Олеговна, мл. науч. сотр. отделения рентгенодиагностики отдела лучевых методов диагностики опухолей консультативно-диагностического центра ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр онкологии им. Н.Н. Блохина» Минздрава России;
<http://orcid.org/0000-0002-6704-3676>

Тюрин Игорь Евгеньевич, д. м. н., профессор, зам. директора по научной и образовательной работе ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр онкологии им. Н.Н. Блохина» Минздрава России, заведующий кафедрой рентгенологии и радиологии ФГБОУ ДПО «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования» Минздрава России, главный внештатный специалист по лучевой и инструментальной диагностике Минздрава России;
<http://orcid.org/0000-0003-3931-1431>

Резюме

Актуальность. В клинической практике на сегодняшний день информация, содержащаяся в компьютерных томографических (КТ) изображениях рака легкого, используется не в полной мере – лишь несколько семантических характеристик (например, размеры, контуры, характер накопления контрастного препарата и т.д.). Сегодня исследователями предпринимаются попытки преобразовать данные КТ-изображений в количественные показатели, описывающие форму и текстуру рака легкого, а также связать эти показатели с клиническими данными. Такой подход получил название «радиомика» и представляет собой развивающуюся область в медицине.

Цель: провести анализ публикаций, посвященных дифференциальной диагностике немелкоклеточного рака легкого (НМРЛ) с помощью текстурного анализа, а также оценить возможности и перспективы применения этого метода для увеличения информативности КТ-исследований.

Материал и методы. В обзоре литературы представлены данные, полученные из доступных источников в базах данных PubMed, ScienceDirect и Google Scholar, опубликованные до конца 2024 г. включительно, найденные с помощью ключевых слов и словосочетаний на русском и английском языках: «НМРЛ», «аденокарцинома легкого», «плоскоклеточный рак легкого», «компьютерная томография», «радиомика», «текстурный анализ», «дифференциальная диагностика», “NSCLC”, “lung adenocarcinoma”, “squamous cell lung cancer”, “computed tomography”, “radiomics”, “texture analysis”, “differential diagnosis”.

Результаты. В обзоре литературы описаны методики текстурного анализа на всех этапах. По результатам проанализированных научных работ авторы приходят к выводу, что применение текстурного анализа позволяет с чувствительностью 72–83%, специфичностью 67–92% и точностью 74–86% неинвазивно предсказать гистологическую форму НМРЛ.

Заключение. Применение текстурного анализа согласно опубликованным работам является перспективным методом для дифференциальной диагностики гистологических форм НМРЛ (до AUC ~0,7–0,9), однако различие методик и отсутствие стандартизации проведения текстурного анализа требует проведения дополнительных исследований.

Ключевые слова: компьютерная томография; текстурный анализ; немелкоклеточный рак легкого; обзор.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Воробьева В.О., Тюрин И.Е. Текстурный анализ КТ-изображений в дифференциальной диагностике немелкоклеточного рака легкого. Вестник рентгенологии и радиологии. 2024; 105(6): 335–343. <https://doi.org/10.20862/0042-4676-2024-105-6-335-343>

Для корреспонденции: Воробьева Валентина Олеговна, E-mail: jalav.09@mail.ru

Статья поступила 19.03.2025

После доработки 30.03.2025

Принята к печати 15.06.2025

Texture Analysis of CT Images in Differential Diagnosis of Non-Small Cell Lung Cancer

Valentina O. Vorobeva¹, Igor E. Tyurin^{1,2}

¹ Blokhin National Medical Research Center of Oncology,
Kashirskoe shosse, 23, Moscow, 115522, Moscow, Russian Federation

² Russian Medical Academy of Continuous Professional Education,
ul. Barrikadnaya, 2/1, str. 1, Moscow, 125993, Russian Federation

Valentina O. Vorobeva, Junior Researcher, X-ray Diagnostics Unit, Department of Radiation Methods for Tumor Diagnostics, Consultative and Diagnostic Center, Blokhin National Medical Research Center of Oncology;
<http://orcid.org/0000-0002-6704-3676>

Igor E. Tyurin, Dr. Med. Sc., Professor, Deputy Director for Scientific and Educational Work, Blokhin National Medical Research Center of Oncology; Chief of Chair of Roentgenology and Radiology, Russian Medical Academy of Continuous Professional Education; Chief Specialist in Radiation and Instrumental Diagnostics of the Ministry of Health of the Russian Federation;
<http://orcid.org/0000-0003-3931-1431>

Abstract

Background. In current clinical practice, the information contained in computed tomography (CT) images of lung cancer is not used to its full extent – only a few semantic characteristics (e.g. size, contours, nature of contrast agent accumulation, etc.). Today, researchers are attempting to transform CT image data into quantitative indicators describing the shape and texture of lung cancer, as well as to link these indicators with clinical data. This approach is called “radiomics” and is a developing field in medicine.

Objective: to analyze publications on differential diagnosis of non-small cell lung cancer (NSCLC) using texture analysis as well as to assess the possibilities and prospects of this method in increasing information content of CT studies.

Material and methods. The literature review presents data obtained from available sources in PubMed, ScienceDirect and Google Scholar databases, published up to and including the end of 2024, found using the key words and phrases in Russian and English languages: “NSCLC”, “lung adenocarcinoma”, “squamous cell lung cancer”, “computed tomography”, “radiomics”, “texture analysis”, “differential diagnostics”.

Results. The literature review describes the methods of texture analysis at all stages. Based on the results of the studied scientific works, the authors conclude that the use of texture analysis allows non-invasively predicting the histological form of NSCLC with sensitivity 72–83%, specificity 67–92%, and accuracy 74–86%.

Conclusion. The use of texture analysis, according to published studies, is a promising method for differential diagnosis of histological forms of NSCLC (up to AUC ~0.7–0.9), however, the difference in methods and the lack of standardization of texture analysis require additional research.

Keywords: computed tomography; texture analysis; non-small cell lung cancer; review.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

For citation: Vorobeva VO, Tyurin IE. Texture analysis of CT images in differential diagnosis of non-small cell lung cancer. *Journal of Radiology and Nuclear Medicine*. 2024; 105(6): 335–343 (in Russian). <https://doi.org/10.20862/0042-4676-2024-105-6-335-343>

For corresponding: Valentina O. Vorobeva, E-mail: jalav.09@mail.ru

Received March 19, 2025

Revised March 30, 2025

Accepted June 15, 2025

Введение / Introduction

Рак легкого занимает лидирующее место в мире и в Российской Федерации по заболеваемости и смертности населения, составляя около 90% от всех новообразований легких [1–3]. Исторически выделяют два его типа: мелкоклеточный рак легкого (МРЛ) и немелкоклеточный рак легкого (НМРЛ) [4]. Важным и нередко основным способом лечения НМРЛ является хирургическая резекция, в то время как для МРЛ методом выбора служит лекарственная и лучевая терапия [5].

На НМРЛ приходится до 85% случаев рака легкого, его наиболее распространенными гистологическими формами являются плоскоклеточный рак (ПКР) и аденокарцинома (АК), которые составляют около 70% случаев [4, 6]. Соотношение этих гистологических типов имеет значительные географические и этнические различия [7–9]. АК легкого встречается чаще ПКР легкого как в европейской, так и в азиатской популяции – 40–50% против 25–40% случаев [10, 11].

Гистологически ПКР представлен солидными полями клеток с плоскоклеточной дифференцировкой, часто с формированием роговых масс. Выраженность признаков ороговения в клетках позволяет определить принадлежность опухоли к ороговевающему (высокодифференцируемому) или неороговевающему (умеренно- и низкодифференцируемому) типу [3, 6].

Центрально расположенная АК образуется из клеток эпителия бронхиальных желез, а периферическая – из эпителия терминальных отделов бронхов и пневмоцитов 2-го порядка. На основании обнаружения клеточных, структурных и функциональных признаков железистой дифференцировки (ацинусы, папиллярные структуры, розетки, слизь и т.д.) выделяют следующие типы: стелющийся (lepidic), ацинарный, папиллярный, солидный и микропапиллярный. Кроме того, по степени дифференцировки АК может быть определена как высоко-, умеренно- и низкодифференцированная [3, 6].

Выбор лечения, особенно таргетная терапия и иммунотерапия, зависит от гистологического типа рака легкого и распространенности процесса, что прямо влияет на терапевтический эффект, выживаемость и качество жизни пациента [5, 6].

«Золотым стандартом» в верификации рака легкого является морфологическое исследование, для проведения которого необходим образец ткани опухоли в достаточном количестве и надлежащего качества, полученный с помощью биопсии или хирургической резекции. Однако имеются ограничения в виде инвазивности методик и их травматичности, которые могут вызвать такие осложнения, как кровохарканье, пневмоторакс и гемоторакс [3, 5, 6]. Также полученный образец ткани может быть ограничен участком межопухолевой и внутриопухолевой гетерогенности, что может привести к неполной морфологической картине опухоли и ее фенотипу, а у некоторых пациентов выполнение биопсии невозможно или неинформативно даже при многократных биопсиях. [7]. В связи с этим в 1/3 случаев лечение назначается без морфологической верификации, только на основании клинико-рентгенологической картины [3].

В клинической практике для диагностики рака легкого и оценки распространенности процесса широко используется компьютерная томография (КТ). Однако при КТ семиотические признаки образований в легких могут быть сходными, поэтому бывает сложно провести дифференциальную диагностику, в том числе и предположить гистологическую форму рака. Визуальная оценка новообразований даже при КТ в значительной степени зависит от знаний, аналитических навыков и опыта врача-рентгенолога [9].

С учетом вышеперечисленного необходимы новые методы выделения признаков и анализа

КТ-изображений, которые могут помочь рентгенологам и онкологам повысить точность лучевой диагностики [10].

Текстурный анализ (ТА) на сегодняшний день представляет собой перспективный метод оценки медицинских изображений с возможностью получения недоступной невооруженному глазу информации. ТА позволяет выявить изменения структуры ткани и оценить гетерогенность внутри интересующей области медицинских изображений, основываясь на характеристиках распределения уровней серого [10]. Теоретической основой ТА является неоднородность изображения, связанная с различными гистологическими и генетическими характеристиками опухоли. Текстурные признаки медицинских изображений не могут быть напрямую визуализированы врачами-рентгенологами, их можно определить только с помощью программного обеспечения, которое позволяет оценить неоднородность изображения в виде числовых значений и предоставить дополнительную информацию [5, 6].

С каждым годом растет количество опубликованных работ, в которых используются различные методы ТА для дифференцировки гистологических подтипов рака легкого [4, 6].

Цель – провести анализ публикаций, посвященных дифференциальной диагностике НМРЛ с помощью текстурного анализа, а также оценить возможности и перспективы применения этого метода для увеличения информативности КТ-исследований.

Материал и методы / Material and methods

Проанализированы данные, полученные из доступных источников в базах данных PubMed, ScienceDirect и Google Scholar. Для поиска использовались ключевые слова и словосочетания на русском и английском языках: «НМРЛ», «аденокарцинома легкого», «плоскоклеточный рак легкого», «компьютерная томография», «радиомика», «текстурный анализ», «дифференциальная диагностика», «NSCLC», «lung adenocarcinoma», «squamous cell lung cancer», «computed tomography», «radiomics», «texture analysis», «differential diagnosis».

В анализ включены оригинальные научные статьи. Критерии отбора были следующие: 1) пациенты с НМРЛ (АК и ПКР) до проведения какого-либо вида лечения; 2) текстурный анализ КТ-изображений в дифференциальной диагностике АК и ПКР легкого. Исследования исключались из обзора, если они не относились к интересующей области и не соответствовали критериям включения.

Поиск исследований проводился до конца 2024 г., все найденные работы, соответствующие критериям отбора, были опубликованы в период с 2011 по 2024 гг. включительно. Всего отобрано 23 статьи: 19 исследований были одноцентровыми [6,

12–29], оставшиеся 4 – многоцентровыми [30–33]. Все исследования были ретроспективными, кроме одного, в котором проведена независимая проспективная проверка классификатора на новой выборке, что повышает степень достоверности результатов [29]. Количество пациентов, включенных в исследования, варьировалось от 40 до 510.

Валидация в проанализированных исследованиях, как правило, выполнялась методом кросс-валидации или разделением выборки на обучающую и контрольную группы. W. Wu et al. проводили обучение/проверку на двух когортах (350 пациентов из разных центров) [31], а U. Bashir et al. выполняли внешнюю валидацию на второй выборке (n=100) [16].

Результаты / Results

Этапы текстурного анализа при НМРЛ

ТА состоит из следующих этапов (рис. 1): этап получения изображения (претекстурный этап), этап сегментации, этап выбора и извлечения объекта и этап анализа данных.

Первым этапом ТА во всех исследованиях является получение высококачественных стандартизированных изображений. Для выполнения ТА используются изображения в формате DICOM, который получается в результате реконструкции не-

обработанных данных КТ, выполненной по рутинному протоколу исследования органов грудной клетки, в том числе с внутривенным контрастированием, – нативная, артериальная и венозная фазы [34, 35].

Все авторы проанализированных публикаций проводили ТА на КТ-изображениях. Параметры КТ-исследований: толщина реконструированного среза от 0,625 до 5 мм, напряжение на рентгеновской трубке от 80 до 140 кВ, сила тока на рентгеновской трубке от 38 до 699 мА.

В преобладающем большинстве исследований выполнялся анализ только нативной фазы, контрастные фазы оценивались лишь в двух работах [19, 20]. Объем использованного контрастного вещества составлял от 70 до 150 мл, скорость введения контрастного вещества – 3 мл/с. Сравнительный анализ КТ-изображений с использованием контрастного препарата и без него в исследовании H. Liu et al. [20] показал преимущество контрастных фаз в дифференциальной диагностике. E. Linning et al. провели оценку эффективности различных фаз КТ, при этом использовали метод инкрементного прямого отбора признаков (incremental forward feature selection), позволивший повысить точность: AUC 0,867, которая была достигнута в венозной фазе [19].

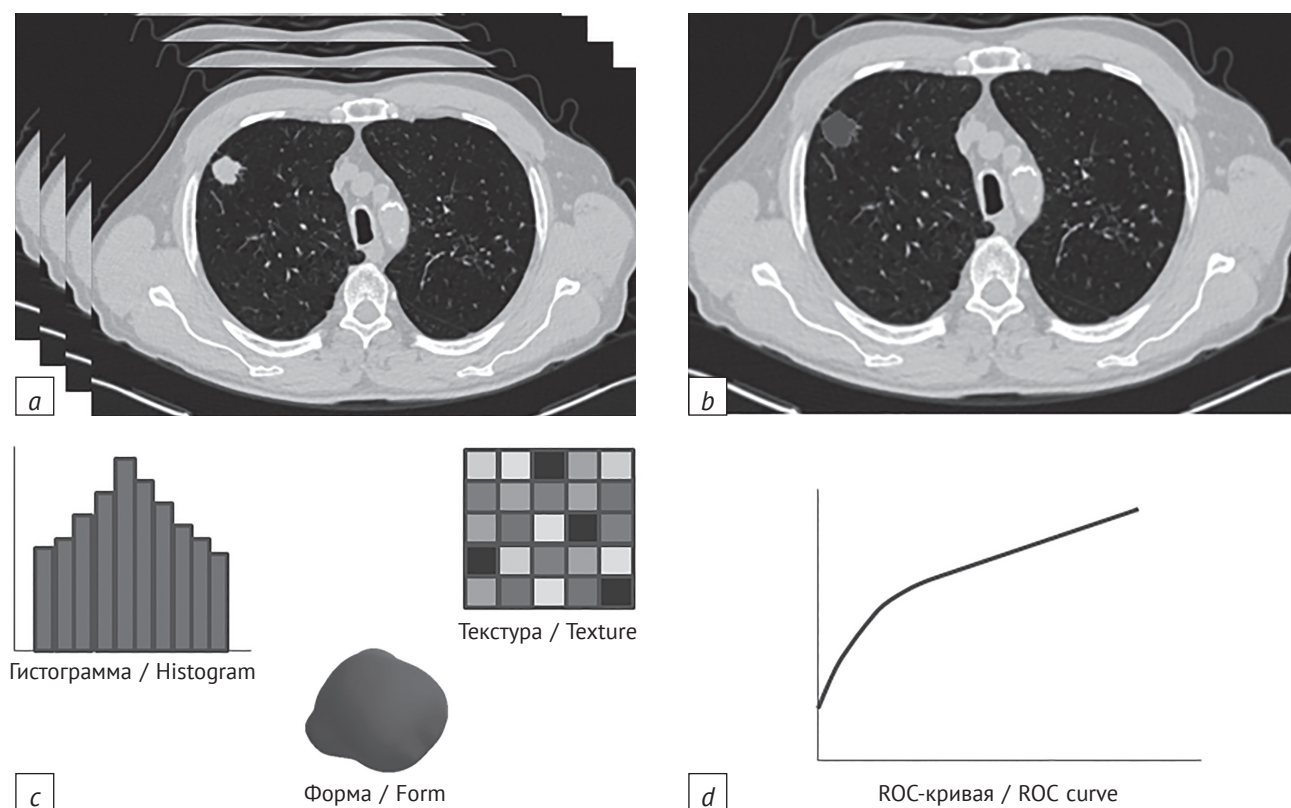


Рис. 1. Этапы текстурного анализа:

a – получение изображений; *b* – сегментация; *c* – выбор и извлечение объектов; *d* – анализ данных

Fig. 1. Texture analysis stages:

a – obtaining images; *b* – segmentation; *c* – selecting and extracting objects; *d* – data analysis

Следующим шагом является определение локализации и размера опухоли, ее формы, структуры, характера накопления контрастного вещества, четкости контуров, оценка инвазии в прилежащие ткани и т.д. Данный этап – основополагающий в работе врача-рентгенолога [35].

На КТ-изображениях опухоль ПКР обычно визуализируется в проксимальных участках трахеобронхиального дерева, в области корня легкого и средостения. В 40% случаев ПКР может выглядеть как солидная опухоль с нечеткими, бугристыми контурами, с гетерогенной структурой за счет наличия участков центрального некроза и полостей, содержащих газ и/или жидкость [36]. При АК инвазивная опухоль чаще развивается в периферических отделах (в 90% случаев) в виде участка уплотнения с лучистыми контурами, часто с наличием симптома воздушной бронхограммы, псевдокист и локальным втяжением плевры [8, 36]. Наличие особой формы распространения опухолевых клеток в виде их стелющегося роста вдоль поверхности альвеол без инвазии в строму соответствует КТ-симптому матового стекла [37]. В результате опухоль по типу АК может быть представлена солидным очагом тканевой плотности или субсолидным очагом в виде очага матового стекла или сочетания двух компонентов (частично солидный очаг) [6, 37]. Симптом матового стекла является при КТ, но крайне редко определяется в структуре опухолевого очага при рентгено-томографическом исследовании [37]. В связи с этим разграничение гистологических типов по данным КТ представляет большие сложности.

Процесс сегментации солидных образований на КТ-изображениях основан на выявлении различий в плотности. Определенный контраст между солидной структурой образования и окружающими неизмененными тканями легких упрощает сегментацию, выполняемую вручную или полуавтоматически/автоматически. Однако сегментация субсолидных образований, к которым относятся очаги матового стекла и частично субсолидные очаги, затруднена, особенно для полуавтоматического/автоматического программного обеспечения из-за нечетких границ. Трудности также возникают при обведении контуров опухолей, которые тесно прилегают к грудной стенке, средостению и другим тканям/органам [34, 38].

Использование узких окон КТ (например, ширина 150 HU, центр 40 HU) может помочь в определении границ опухоли. Некоторые авторы придерживаются мнения, что участки кавитации и кальцинаты в структуре опухоли не должны включаться в область интереса и могут быть исключены с помощью инструментов сегментации. Участки некроза не запрещено включать в область интереса, поскольку в настоящее время нет данных, под-

тверждающих их влияние на полученные значения текстурных характеристик [39].

При анализе данных литературы (23 публикации) установлено, что 2D-анализ применялся авторами 4 исследований [18–20, 23], 2D-анализ на нескольких срезах проводился в 1 работе [33], 3D-анализ – в 10 [6, 13, 15, 22, 23, 24, 27, 28, 30, 31], а 2D- и 3D-анализ – в 2 [12, 29]. В остальных публикациях выбранный анализ указан не был. Ручная сегментация была использована в 14 исследованиях [6, 15, 16, 20–23, 25, 26, 28–31, 33], полуавтоматическая – в 6 [14, 17–19, 24, 27], автоматическая – в 3 [12, 13, 32].

Наиболее популярным программным обеспечением для сегментации оказалось ITK-SNAP [15, 16, 20, 27, 29], следом за ним – Weasis [18, 19], MITK [34], Pinnacle3 [14], TexRAD [17], LIFEx [23] и др.

Для извлечения текстурных признаков авторы наиболее часто использовали Matlab [14–16, 18, 19, 31], PyRadiomics – Python-пакет стандарта IBSI [24, 27–29], LIFEx [22], MaZda [22] и др. Извлеченные текстурные признаки во всех работах включали признаки первого, второго и более высокого порядков, а также признаки формы.

Признаками первого порядка является среднее значение, медиана, минимум, максимум, асимметрия, эксцесс, однородность и дисперсия. Пик распределения в гистограмме представляет собой эксцесс и является маркером васкуляризации и ангиогенеза в опухоли. Сложность или неоднородность структуры представлена энтропией. Сосудистые структуры представлены эксцессом, а распределение несосудистых структур – асимметрией [17].

Текстурные показатели второго порядка включают сотни характеристик, полученных путем оценки взаимосвязи соседних пикселей в области интереса или по всему опухолевому поражению. Эти показатели учитывают как интенсивность значения в шкале серого, так и его расположение или ориентацию на изображении. КТ-изображения формируются из трехмерной матрицы данных, которая используется для определения количества оттенков серого, отображаемых для каждого пикселя. Если в пределах заданной области наблюдаются значительные различия в количестве серого цвета, то область считается более неоднородной – имеющей грубую текстуру [40–42].

Признаки более высокого порядка могут быть получены путем применения фильтров к области интереса или изображению перед извлечением текстурных признаков [42, 43]. Например, вейвлет-преобразование (wavelet transform) разделяет изображение на низкочастотные (грубые характеристики) и высокочастотные (тонкие характеристики) области, что позволяет получить новые данные [44–46]. Z. Khodabakhshi et al. из исходных

КТ-изображений получили 1433 признака, включая морфологические и текстурные [28].

Как правило, в наборах данных для разработки исследований извлекается от десятков до нескольких тысяч текстурных признаков изображений. Наибольшее количество полученных признаков в исследовании Y. Guo et al. составило 1743 [27].

Уменьшение размерности для исключения сильно коррелирующих и нестабильных признаков часто используется перед поиском наиболее информативных признаков для конкретного результата в тестовом наборе данных. Существует множество различных статистических вариантов для создания модели на основе радиомических признаков (например, корреляционный анализ, t-тест, U-критерий Манна–Уитни, LASSO, SVM-RFE, mRMR и др.) [47]. X. Zhu et al. [15] и M. Selvam et al. [29] использовали модель LASSO, которая помогла одновременно уменьшить число признаков и избежать переобучения. ReliefF (алгоритм, оценивающий значимость через соседей разных классов) упоминался в работе W. Wu et al. [31] как один из лучших. Иногда авторы комбинировали несколько моделей [14, 28].

Независимо от выбора признаков и методологии моделирования, полученная модель (которую часто называют «радиологической сигнатурой») должна быть тщательно проверена в соответствии с рекомендациями TRIPOD, чтобы убедиться, что она воспроизводима в различных клинических наборах данных. Это позволит проверить, связана ли наблюдаемая сигнатура с желаемым результатом в другой группе пациентов, и снизить риск переобучения в обучающей выборке. Радиологические признаки будут иметь клиническую ценность только в том случае, если они предоставляют больше прогностической информации, чем та, которая доступна в настоящее время в клинической практике [48–50].

После отбора текстурных признаков создаются классификаторы. Наиболее часто используемыми классификаторами оказались: метод опорных векторов – SVM (6/23) [18–20, 26, 28, 32], логистическая регрессия – LASSO (3/23) [15, 29, 33], логистическая регрессия – LR (4/23) [6, 17, 21–23], наивный байесовский классификатор – Naive Bayesian (2/23) [14, 31] и случайный лес – RF (2/23) [16, 24].

Лучшей моделью в работе W. Wu et al. [31] стал наивный байесовский классификатор – Naive Bayesian (AUC 0,72 с 5 признаками). U. Bashir et al. [16] обучили случайный лес – RF для сравнения текстурных и семантических признаков (AUC 0,78 – обучающая выборка, AUC 0,82 – контрольная выборка). Y. Guo et al. [27] и M. Selvam et al. [29] использовали классификаторы случайного леса – RF (AUC 0,789, точность 74,7% и AUC 0,88, точность 83% соответственно), а S.R. Digumarthy et al. [17] применили логистическую регрессию – LR (AUC 0,923).

Применение методов глубокого обучения, в частности 3D-CNN в работах Y. Guo et al. [29] и P. Marentakis et al. [25], показали потенциальное преимущество, однако они требуют больших обучающих выборок и стандартизации предобработки.

Некоторые авторы совмещали несколько подходов. Так, P. Marentakis et al. [25] совместили сверточную нейронную сеть (CNN) и рекуррентную нейронную сеть с долгой краткосрочной памятью (LSTM) (AUC 0,78, чувствительность 0,81, специфичность 0,67).

Таким образом, чаще всего в моделях фигурируют классические методы (SVM, RF, LR, Naive Bayesian), а в более поздних работах – глубокие нейронные сети (CNN, CapsNet, LSTM) либо комбинированные.

Модели классификации (SVM, RF, LR, Naive Bayes, CNN+LSTM) демонстрируют AUC 0,7–0,9 при внутренней валидации, а при внешней этот показатель часто снижается до 0,8. Лучшие результаты (AUC ≥ 0,9) получены на небольших выборках с оптимизацией внутри когорты, что требует подтверждения на независимых данных. В таблице 1 представлены проанализированные работы с умеренными и высокими метриками.

Различия АК и ПКР по данным текстурного анализа

Результаты исследований показали, что АК имеет более однородную структуру, чем ПКР, что косвенно может отражать структуру самой опухоли. АК в основном состоит из железистых структур, таких как железистые протоки и полости, в то время как ПКР главным образом содержит ороговевающие клетки и/или межклеточные десмосомы кератина. Кроме того, АК имеет различные темпы роста, относительно небольшое количество опухолевых клеток на единицу объема опухоли с выраженной стромой, низким содержанием воды и относительно равномерным распределением. В отличие от этого, ПКР характеризуется большим количеством опухолевых клеток на единицу объема опухоли, более высоким содержанием воды и неравномерным распределением различных клеток, что приводит к формированию некроза и относительно неравномерной плотности [38].

Субсолидные опухоли часто имеют более низкие значения однородных характеристик (например, GLCM-энергия), но более высокие значения неоднородных характеристик (например, GLSZM-вариабельность зоны размера), чем солидные опухоли [44].

S. Raptis et al. [51] доказали, что основным фактором, определяющим значимость конкретных признаков, является размер опухоли. При этом признаки, основанные на текстуре, более важны на ранних стадиях рака малых размеров (менее 2 см),

Таблица 1

Table 1

Проанализированные работы с умеренными и высокими метриками

Analyzed works with moderate and high metrics

Исследование	Выборка пациентов (АК, ПКР)	Дизайн исследования	Источник сбора данных	Метод сегментации	ПО для сегментации	Алгоритм или ПО для извлечения ТП	Общее (окончательное) число ТП	Особенности ТА	Методы выбора функций ТА	Классификационная модель	Производительность модели
H. Liu, et al. (2019) [20]	87 (47, 40)	Сравнение характеристик текстуры между КТ-изображениями без КУ и с ним при НМРП	Ретроспективное однокентровое	2D, ручная	Digital biopsy	Mazda	261 (5)	Histogram, GLCM, RLM, gradient, AR	Fisher Score	SVM	AUC 0,954
X. Zhu et al. (2018) [15]	129 (81, 48)	ПКР против АК	Ретроспективное однокентровое	3D, ручная	ITK-SNAP	Matlab	485 (5)	Intensity, shape and size, texture, and wavelet filter	LASSO	LASSO	AUC 0,905, Se 83%, Sp 92,9%
D. Yu et al. (2017) [13]	434 (324, 110)	Классификация НМРП	Ретроспективное однокентровое	3D, автоматическая	Toboggan Based Growing Automatic (TBGA)	-	52 (-)	First, second, high-order	Iterative forward including and backward elimination	RUSBoost	AUC 0,91, Se 82,6%, Sp 78,3%
S.R. Diguamrthy et al. (2019) [17]	94 (69, 25)	Прогнозирование гистологической формы НМРП	Ретроспективное однокентровое	-; полуавтоматическая	TexRAD	CTTA software	11 (-)	-	Pearson correlation analysis	LR	AUC 0,923
J. Liu et al. (2019) [30]	349 (71, 121)	Классификация НМРП	Ретроспективное многокентровое	3D, ручная	-	-	1029 (247)	-	Statistics, gray level co-occurrence matrix, and gray level size zone matrix	SLS	AUC 0,89 (обучающая выборка), AUC 0,86 (контрольная выборка)
M. Selvam et al. (2024) [29]	74 (46, 28)	Классификация НМРП	Ретроспективное проспективное однокентровое	2D и 3D, ручная	ITK-SNAP	PyRadiomics	101 (10)	Shape, texture, intensity	LASSO, mRMR, Random Forest Classifier	LASSO	AUC 0,88, Ac 83%
E. Linning et al. (2019) [19]	174 (90, 84)	Классификация АК и ПКР без КУ и с ним	Ретроспективное однокентровое	2D, полуавтоматическая	Weasis	Matlab	1160 (869)	Shape, size, boundary sharpnes, texture	CCC, hierarchical clustering, mRMR, incremental forward search	SVM	AUC 0,867 достигнута в венозной фазе
Y. Tomori et al. (2020) [22]	40 (22, 18)	Прогнозирование гистологической формы НМРП	Ретроспективное однокентровое	3D, ручная	LIFEx	LIFEx	42 (26)	Histogram, shape, GLCM, GLRLM, NGLDM, GLZLM	Mann-Whitney U test	LR	AUC 0,81 для GLRLM_SRHGE и GLZLM_HGZE
R. Han et al. (2020) [6]	70 (41, 29)	Прогнозирование гистологической формы НМРП	Ретроспективное однокентровое	3D, ручная	CTKinetics APP	CTKinetics APP	42 (-)	Histogram, GLCM, GLRLM	t-test, Wilcoxon test, Spearman correlation analysis	LR	AUC 0,803, Se 77%, Sp 89%

Примечание. АК – аденокарцинома; ПКР – плоскоклеточный рак; ПО – программное обеспечение; ТП – текстовый признак; ТА – текстуальный анализ; КТ – компьютерная томография; КУ – контрастное усиление; НМРП – немелкоклеточный рак легкого; AUC (area under curve) – площадь под кривой; Se (sensitivity) – чувствительность; Sp (specificity) – специфичность; Ac (accuracy) – точность.

в то время как признаки, основанные на форме, приобретают значимость по мере роста опухолей. Более высокие показатели энтропии GLCM связаны с высокой вероятностью злокачественной опухоли, поскольку данный признак отражает неоднородность текстуры, которая часто указывает на агрессивность опухоли [51, 52].

Заключение / Conclusion

Несмотря на то что использование радиологических признаков, извлеченных из медицинских изображений, открывает новые возможности и демонстрирует высокую эффективность,

на сегодняшний день для успешного внедрения ТА в рутинную клиническую практику необходимы стандартизация методов (Image Biomarker Standardisation Initiative, IBSI), расширение открытых баз данных, интеграция методов машинного обучения для автоматизированного анализа данных, внешняя валидация разработанных моделей и обучение врачей-рентгенологов работе с радиомическими параметрами.

Будущее радиомики в дифференциальной диагностике НМРЛ связано с внедрением моделей, которые будут объединять текстурные, гистологические и молекулярные данные.

Литература [References]

- Global Cancer Observatory: Cancer Today. International Agency for Research on Cancer. 2024. URL: <https://gco.iarc.who.int/today> (дата обращения 12.10.2024). [Global Cancer Observatory: Cancer Today. International Agency for Research on Cancer. 2024. Available at: <https://gco.iarc.who.int/today> (accessed 12.10.2024).]
- Шахзадова А.О., Старинский В.В., Лисичникова И.В. Состояние онкологической помощи населению России в 2022 году. Сибирский онкологический журнал. 2023; 22(5): 5–13. <https://doi.org/10.21294/1814-4861-2023-22-5-5-13>. [Shakhzadova AO, Starinsky VV, Lisichnikova IV. Cancer care to the population of Russia in 2022. Siberian Journal of Oncology. 2023; 22(5): 5–13 (in Russ). <https://doi.org/10.21294/1814-4861-2023-22-5-5-13>.]
- Лактионов К.К., Бредер В.В. (ред.) Рак легкого. М.: Гранат; 2020: 151 с. [Laktionov KK, Breder VV (Eds). Lung cancer. Moscow: Granat; 2020: 151 pp (in Russ).]
- Socinski MA, Obasaju C, Gandara D, et al. Clinicopathologic features of advanced squamous NSCLC. J Thorac Oncol. 2016; 11(9): 1411–22. <https://doi.org/10.1016/j.jtho.2016.05.024>.
- Лактионов К.К., Артамонова Е.В., Борисова Т.Н. и др. Злокачественное новообразование бронхов и легкого. Современная онкология. 2021; 23(3): 369–402. <https://doi.org/10.26442/18151434.2021.3.201048>. [Laktionov KK, Artamonova EV, Borisova TN, et al. Malignant neoplasm of the bronchi and lung: Russian clinical guidelines. Journal of Modern Oncology. 2021; 23(3): 369–402 (in Russ). <https://doi.org/10.26442/18151434.2021.3.201048>.]
- Han R, Arjal R, Dong J, et al. Three dimensional texture analysis of noncontrast chest CT in differentiating solitary solid lung squamous cell carcinoma from adenocarcinoma and correlation to immunohistochemical markers. Thorac Cancer. 2020; 11(11): 3099–106. <https://doi.org/10.1111/1759-7714.13592>.
- Сибилева О.Ю., Ромашкина Н.В. Эпидемиология рака легкого и роль молекулярно-генетического исследования в терапии заболевания (краткий обзор литературы). Вестник новых медицинских технологий. 2023; 30(2): 92–6. <https://doi.org/10.24412/1609-2163-2023-2-92-96>. [Sibileva OY, Romashkina NV. Lung cancer epidemiology and the role of molecular genetic testing in the therapy of the disease (literature review). Journal of New Medical Technologies. 2023; 30(2): 92–6 (in Russ). <https://doi.org/10.24412/1609-2163-2023-2-92-96>.]
- Новикова С.В., Важенин А.В., Тюков Ю.А. Рак легкого: эпидемиология, диагностика и профилактика (обзор литературы). Непрерывное медицинское образование и наука. 2024; 19(4): 22–7. [Novikova SV, Vazhenin AV, Tyukov YuA. Lung cancer: epidemiology, diagnosis and prevention (literature review). Continuous Medical Education and Science. 2024; 19(4): 22–7 (in Russ).]
- Barta JA, Powell CA, Wisnivesky JP. Global epidemiology of lung cancer. Ann Glob Health. 2019; 85(1): 8. <https://doi.org/10.5334/aogh.2419>.
- Cheng TYD, Cramb SM, Baade PD, et al. The international epidemiology of lung cancer: latest trends, disparities, and tumor characteristics. J Thorac Oncol. 2016; 11(10): 1653–71. <https://doi.org/10.1016/j.jtho.2016.05.021>.
- Lin HT, Liu FC, Wu CY, et al. Epidemiology and survival outcomes of lung cancer: a population-based study. Biomed Res Int. 2019; 4(1): 8148156. <https://doi.org/10.1155/2019/8148156>.
- Basu S, Hall LO, Goldgof D, et al. Developing a classifier model for lung tumors in CT-scan images. In: 2011 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Anchorage, AK, USA, 2011, pp. 1306–12. <https://doi.org/10.1109/ICSMC.2011.6083840>.
- Yu D, Zang Y, Dong D, et al. Developing a radiomics framework for classifying non-small cell lung carcinoma subtypes. In: Medical Imaging 2017: Computer-Aided Diagnosis. 2017; 10134: 570–6. <https://doi.org/10.1117/12.2253923>.
- Haga A, Takahashi W, Aoki S, et al. Classification of early stage non-small cell lung cancers on computed tomographic images into histological types using radiomic features: interobserver delineation variability analysis. Radiol Phys Technol. 2018; 11(1): 27–35. <https://doi.org/10.1007/s12194-017-0433-2>.
- Zhu X, Dong D, Chen Z, et al. Radiomic signature as a diagnostic factor for histologic subtype classification of non-small cell lung cancer. Eur Radiol. 2018; 28(7): 2772–8. <https://doi.org/10.1007/s00330-017-5221-1>.
- Bashir U, Kawa B, Siddique M, et al. Non-invasive classification of non-small cell lung cancer: a comparison between random forest models utilising radiomic and semantic features. Br J Radiol. 2019; 92(1099): 20190159. <https://doi.org/10.1259/bjr.20190159>.
- Digumarthy SR, Padole AM, Gullo RL, et al. Can CT radiomic analysis in NSCLC predict histology and EGFR mutation status? Medicine. 2019; 98(1): e13963. <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000013963>.
- Linning E, Lu L, Li L, et al. Radiomics for classification of lung cancer histological subtypes based on nonenhanced computed tomography. Acad Radiol. 2019; 26(9): 1245–52. <https://doi.org/10.1016/j.acra.2018.10.013>.
- Linning E, Lu L, Li L, et al. Radiomics for classifying histological subtypes of lung cancer based on multiphasic contrast-enhanced computed tomography. J Comput Assist

- Tomogr. 2019; 43(2): 300–6.
<https://doi.org/10.1097/RCT.0000000000000836>.
20. Liu H, Jing B, Han W, et al. A comparative texture analysis based on NECT and CECT images to differentiate lung adenocarcinoma from squamous cell carcinoma. *J Med Syst*. 2019; 43(3): 59. <https://doi.org/10.1007/s10916-019-1175-y>.
 21. Brunese L, Mercaldo F, Reginelli A, Santone A. Lung cancer detection and characterisation through genomic and radiomic biomarkers. In: 2020 International Joint Conference on Neural Networks. Piscataway. IEEE. 2020; 4408–15. <https://doi.org/10.1109/ijcnn48605.2020.9206797>.
 22. Tomori Y, Yamashiro T, Tomita H, et al. CT radiomics analysis of lung cancers: differentiation of squamous cell carcinoma from adenocarcinoma, a correlative study with FDG uptake. *Eur J Radiol*. 2020; 128: 109032. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2020.109032>.
 23. Vuong D, Tanadini-Lang S, Wu Z, et al. Radiomics feature activation maps as a new tool for signature interpretability. *Front Oncol*. 2020; 10: 578895. <https://doi.org/10.3389/fonc.2020.578895>.
 24. Li H, Gao L, Ma H, et al. Radiomics-based features for prediction of histological subtypes in central lung cancer. *Front Oncol*. 2021; 11: 658887. <https://doi.org/10.3389/fonc.2021.658887>.
 25. Marentakis P, Karaiskos P, Kouloulas V, et al. Lung cancer histology classification from CT images based on radiomics and deep learning models. *Med Biol Eng Comput*. 2021; 59(1): 215–26. <https://doi.org/10.1007/s11517-020-02302-w>.
 26. Yamada M, Arimura H, Ninomiya K, Soufi M. Automated classification of histological subtypes of NSCLC using support vector machines with radiomic features. In: International Forum on Medical Imaging in Asia. 2019; 11050: 109–12. <https://doi.org/10.1117/12.2521511>.
 27. Guo Y, Song Q, Jiang M, et al. Histological subtypes classification of lung cancers on CT images using 3D deep learning and radiomics. *Acad Radiol*. 2021; 28(9): e258–66. <https://doi.org/10.1016/j.acra.2020.06.010>.
 28. Khodabakhshi Z, Mostafaei S, Arabi H, et al. Non-small cell lung carcinoma histopathological subtype phenotyping using high-dimensional multinomial multiclass CT radiomics signature. *Comput Biol Med*. 2021; 136: 104752. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2021.104752>.
 29. Selvam M, Sadanandan A, Chandrasekharan A, et al. Radiomics for differentiating adenocarcinoma and squamous cell carcinoma in non-small cell lung cancer beyond nodule morphology in chest CT. *Sci Rep*. 2024; 14(1): 32088. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-83786-6>.
 30. Liu J, Cui J, Liu F, et al. Multi-subtype classification model for non-small cell lung cancer based on radiomics: SLS model. *Med Phys*. 2019; 46(7): 3091–100. <https://doi.org/10.1002/mp.13551>.
 31. Wu W, Parmar C, Grossmann P, et al. Exploratory study to identify radiomics classifiers for lung cancer histology. *Front Oncol*. 2016; 6: 71. <https://doi.org/10.3389/fonc.2016.00071>.
 32. Alvarez-Jimenez C, Sandino AA, Prasanna P, et al. Identifying cross-scale associations between radiomic and pathomic signatures of non-small cell lung cancer subtypes: preliminary results. *Cancers*. 2020; 12(12): 3663. <https://doi.org/10.3390/cancers12123663>.
 33. Yang F, Chen W, Wei H, et al. Machine learning for histologic subtype classification of non-small cell lung cancer: a retrospective multicenter radiomics study. *Front Oncol*. 2021; 10: 608598. <https://doi.org/10.3389/fonc.2020.608598>.
 34. Hershman M, Yousefi B, Serletti L, et al. Impact of interobserver variability in manual segmentation of non-small cell lung cancer (NSCLC) applying low-rank radiomic representation on computed tomography. *Cancers*. 2021; 13(23): 5985. <https://doi.org/10.3390/cancers13235985>.
 35. Chen X, Fang M, Dong D, et al. A radiomics signature in preoperative predicting degree of tumor differentiation in patients with non-small cell lung cancer. *Acad Radiol*. 2018; 25(12): 1548–55. <https://doi.org/10.1016/j.acra.2018.02.019>.
 36. Gharraf HS, Mehana SM, ElNagar MA. Role of CT in differentiation between subtypes of lung cancer; is it possible? *Egypt J Bronchol*. 2020; 14: 1–7. <https://doi.org/10.1186/s43168-020-00027-w>.
 37. Zhang S (Ed). *Diagnostic imaging of lung cancers*. Springer; 2024: 3–49. https://doi.org/10.1007/978-981-99-6815-2_1.
 38. Tang X, Wu J, Liang J, et al. The value of combined PET/MRI, CT and clinical metabolic parameters in differentiating lung adenocarcinoma from squamous cell carcinoma. *Front Oncol*. 2022; 12: 991102. <https://doi.org/10.3389/fonc.2022.991102>.
 39. Miles KA. How to use CT texture analysis for prognostication of non-small cell lung cancer. *Cancer Imaging*. 2016; 16: 10. <https://doi.org/10.1186/s40644-016-0065-5>.
 40. Hassani C, Varghese BA, Nieva J, Duddalwar V. Radiomics in pulmonary lesion imaging. *Am J Roentgenol*. 2019; 212(3): 497–504. <https://doi.org/10.2214/AJR.18.20623>.
 41. Gillies RJ, Kinahan PE, Hricak H. Radiomics: images are more than pictures, they are data. *Radiology*. 2016; 278(2): 563–77. <https://doi.org/10.1148/radiol.2015151169>.
 42. Ji Y, Qiu Q, Fu J, et al. Stage-specific PET radiomic prediction model for the histological subtype classification of non-small-cell lung cancer. *Cancer Manag Res*. 2021; 13: 307–17. <https://doi.org/10.2147/CMAR.S287128>.
 43. Ge G, Zhang J. Feature selection methods and predictive models in CT lung cancer radiomics. *J Appl Clin Med Phys*. 2023; 24(1): e13869. <https://doi.org/10.1002/acm2.13869>.
 44. Yip SSF, Liu Y, Parmar C, et al. Associations between radiologist-defined semantic and automatically computed radiomic features in non-small cell lung cancer. *Sci Rep*. 2017; 7(1): 3519. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-02425-5>.
 45. Patil R, Mahadevaiah G, Dekker A. An approach toward automatic classification of tumor histopathology of non-small cell lung cancer based on radiomic features. *Tomography*. 2016; 2(4): 374–7. <https://doi.org/10.18383/j.tom.2016.00244>.
 46. Varghese BA, Cen SY, Hwang DH, Duddalwar VA. Texture analysis of imaging: what radiologists need to know. *Am J Roentgenol*. 2019; 212(3): 520–8. <https://doi.org/10.2214/AJR.18.20624>.
 47. Wu YJ, Wu FZ, Yang SC, et al. Radiomics in early lung cancer diagnosis: from diagnosis to clinical decision support and education. *Diagnostics*. 2022; 12(5): 1064. <https://doi.org/10.3390/diagnostics12051064>.
 48. Fornaçon-Wood I, Faivre-Finn C, O'Connor JPB, Price GJ. Radiomics as a personalized medicine tool in lung cancer: separating the hope from the hype. *Lung Cancer*. 2020; 146: 197–208. <https://doi.org/10.1016/j.lungcan.2020.05.028>.
 49. Ganeshan B, Abaleke S, Young RCD, et al. Texture analysis of non-small cell lung cancer on unenhanced computed tomography: initial evidence for a relationship with tumour glucose metabolism and stage. *Cancer Imaging*. 2010; 10(1): 137–43. <https://doi.org/10.1102/1470-7330.2010.0021>.
 50. Zhao B, Tan Y, Tsai WY, et al. Reproducibility of radiomics for deciphering tumor phenotype with imaging. *Sci Rep*. 2016; 6(1): 23428. <https://doi.org/10.1038/srep23428>.
 51. Raptis S, Ilioudis C, Theodorou K. Uncovering the diagnostic power of radiomic feature significance in automated lung cancer detection: an integrative analysis of texture, shape, and intensity contributions. *BioMedInformatics*. 2024; 4(4): 2400–25. <https://doi.org/10.3390/biomedinformatics4040129>.
 52. Han F, Wang H, Zhang G, et al. Texture feature analysis for computer-aided diagnosis on pulmonary nodules. *J Digit Imaging*. 2015; 28(1): 99–115. <https://doi.org/10.1007/s10278-014-9718-8>.

