

Компьютерная томография в кардиологии: история и перспективы

О.Ю. Миронова[✉], Г.О. Исаев, М.В. Бердышева, В.В. Фомин

ФГАОУ ВО «Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова» Минздрава России (Сеченовский Университет), Москва, Россия

Аннотация

В обзорной статье освещены основные этапы становления компьютерной томографии (КТ) как ключевого метода, использующегося в современной кардиологии. Прогресс КТ-томографов напрямую связан с увеличением количества детекторов, т.е. с увеличением числа одновременно собираемых проекций. Обсуждаются современные разработки и перспективные технологии в области дальнейшего развития методики, включая КТ-ангиографию и другие новые методы оценки коронарного кровотока. Применение технологий искусственного интеллекта в дальнейшем, возможно, позволит усовершенствовать и ускорить интерпретацию получаемых изображений, а также будет экономически оправдано.

Ключевые слова: компьютерная томография (КТ), КТ-ангиография, кардиология, коронарный кровоток, кровообращение, искусственный интеллект

Для цитирования: Миронова О.Ю., Исаев Г.О., Бердышева М.В., Фомин В.В. Компьютерная томография в кардиологии: история и перспективы. Терапевтический архив. 2023;95(9):818–821. DOI: 10.26442/00403660.2023.09.202377

© ООО «КОНСИЛИУМ МЕДИКУМ», 2023 г.

HISTORY OF MEDICINE

Computed tomography in cardiology: history and perspectives

Olga Iu. Mironova[✉], Georgy O. Isaev, Maria V. Berdysheva, Victor V. Fomin

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

Abstract

The review article highlights the main stages of the formation of computed tomography (CT) as a key method used in modern cardiology. The progress of CT scanners is directly related to the increase in the number of detectors, and thus, with an increase in the number of simultaneously collected projections. Modern developments and future technologies in the field of further development of the technique, including CT angiography and other new methods for assessing coronary blood flow, are discussed. The use of artificial intelligence technologies may make it possible to improve and accelerate the interpretation of the resulting images in the future, especially if it is economically justified.

Keywords: computed tomography (CT), coronary CT angiography, cardiology, coronary circulation, artificial intelligence

For citation: Mironova OIu, Isaev GO, Berdysheva MV, Fomin VV. Computed tomography in cardiology: history and perspectives. Terapevticheskii Arkhiv (Ter. Arkh.). 2023;95(9):818–821. DOI: 10.26442/00403660.2023.09.202377

Авиценна утверждал: «Если болезнь определить затруднительно, то не вмешивайся и не торопись». Своевременная диагностика – залог успешного лечения, но, к сожалению, причина недугов не всегда находится на виду, и поэтому и на протяжении долгого времени существовала потребность заглянуть внутрь человеческого тела, не повреждая его.

История первых успешных открытий начинается с 8 ноября 1895 г., когда Вильгельм Конрад Рентген, немецкий физик, экспериментировал в университетской лаборатории и обнаружил «всепроникающие» лучи, которые при

прохождении через ткани кисти на фотопластинке оставляли изображение [1].

Меньше чем через месяц после публикации Рентгена 20 января 1896 г. врачи города Дартмунд (США) с помощью «икс»-лучей увидели перелом руки [2]. Три месяца спустя после открытия Рентгена уже итальянский физик Энрико Сальвиони создал первый рентгеноскопический аппарат, состоящий из рентгеновской трубки и флюоресцентного экрана с одной стороны и окуляра – с другой.

Горизонты рентгенологических исследований с тех пор стали неумолимо расширяться, технологии – совершен-

Информация об авторах / Information about the authors

[✉]Миронова Ольга Юрьевна – д-р мед. наук, проф. каф. факультетской терапии №1 Института клинической медицины им. Н.В. Склифосовского. E-mail: mironova_o_yu@staff.sechenov.ru; ORCID: 0000-0002-5820-1759

Исаев Георгий Олегович – клин. ординатор каф. факультетской терапии №1 Института клинической медицины им. Н.В. Склифосовского. ORCID: 0000-0002-4871-8797

Бердышева Мария Валерьевна – студентка. ORCID: 0000-0002-3393-6863

Фомин Виктор Викторович – чл.-кор. РАН, д-р мед. наук, проф., проректор по инновационной и клинической деятельности, зав. каф. факультетской терапии №1 Института клинической медицины им. Н.В. Склифосовского. ORCID: 0000-0002-2682-4417

[✉]Olga Iu. Mironova. E-mail: mironova_o_yu@staff.sechenov.ru; ORCID: 0000-0002-5820-1759

Georgy O. Isaev. ORCID: 0000-0002-4871-8797

Maria V. Berdysheva. ORCID: 0000-0002-3393-6863

Victor V. Fomin. ORCID: 0000-0002-2682-4417

ствовать, стала внедряться цифровая рентгеноскопия, которая более чем за 100-летнюю историю дала развитие маммографии, компьютерной томографии (КТ) и магнитно-резонансной томографии.

История развития непосредственно КТ начинается в 1917 г. Австрийский математик И. Радон разработал первые математические алгоритмы для КТ [3]. Его заслугой является метод обращения интегрального преобразования, благодаря которому стало возможным восстанавливать первоначальную функцию, зная ее преобразование. Но стоит отметить, что в тот период работа Радона осталась незамеченной исследователями и забытой современниками. В 1963 г. американский физик А. Кормак решил задачу томографического восстановления, однако осуществил это отличным от Радона способом [4].

В 1969 г. британский инженер-физик Г. Хаунсфилд впервые сконструировал так называемый «ЭМИ-сканер», который представлял собой первый компьютерный рентгеновский томограф, клинические испытания которого проведены в 1972 г. [5]. За разработку КТ в 1979 г. Г. Хаунсфилд и А. Кормак удостоились Нобелевской премии в области физиологии и медицины.

I поколение компьютерных томографов появилось в 1973 г. В томографе имелась всего одна рентгеновская трубка, направленная на один детектор. Один оборот позволял получить изображение одного слоя.

Аппараты II поколения являлись пошаговыми: одна трубка, направленная на один детектор. Сканирование осуществлялось шаг за шагом, делая по одному обороту на слой.

III поколение КТ ввело понятие спиральной КТ. Трубка и детекторы за один шаг стола синхронно осуществляли полное вращение по часовой стрелке, что значительно уменьшило время исследования. Увеличилось и количество детекторов. Время обработки и реконструкций заметно уменьшилось.

IV поколение имеет 1088 люминесцентных датчиков, расположенных по всему кольцу гентри. Вращается лишь рентгеновская трубка.

V поколение представлено мультиспиральными компьютерными томографами с возможностью полной 3D-реконструкции. К наиболее современным исследованиям относят спиральные КТ с многорядными расположениями датчиков. В этих томографах напротив источника излучения располагается не один, а несколько детекторов [6].

Развитие ангиографии и КТ-ангиографии

Первые опыты по рентгеновскому исследованию сосудистой системы начались более 100 лет назад. В 1896 г. в Вене S. Haschek и O. Lindental выполнили первую в мире ангиографию с использованием контраста на основе ртути [7]. В 1919 г. аргентинский врач Карлос Хьюсер проводит первое рентгенологическое исследование системы сосудов с использованием йодида калия в качестве контрастного вещества [8]. Активное использование ангиографии началось во 2-м десятилетии XX в., когда появились стандартные методики ангиографии артерий нижних конечностей [9, 10]. На протяжении последующих десятилетий постепенно развивались новые методы оценки кровотока.

В 1929 г. Forssmann впервые провел катетеризацию правых отделов сердца [11], а к концу 40-х разработана методика катетеризации левых отделов сердца, что позволило проводить изолированную вентрикулографию, однако в связи с большим диаметром катетеров изолированное исследование коронарного русла оставалось невозможным. В 1958 г. Sones впервые провел диагностическую коронаро-

графию с помощью катетера собственной разработки (впоследствии получившего название Sones-type катетер) [12].

Исследование сосудов с помощью КТ длительное время представлялось невозможным в связи с большим количеством шумов и низким качеством изображения КТ-снимков. Использование КТ-ангиографии началось с 1990 г., когда W. Kalender и соавт. опубликовали статью об использовании спиральной КТ с контрастным усилением [13].

Первая работа о проведении КТ-коронарографии появилась в 2000 г., когда стало доступно проведение мультиспиральной КТ. К 2005 г. по мере развития технологии мультиспиральной КТ появлялось все больше работ, доказывающих эффективность КТ-коронарографии в диагностике стенотического поражения коронарного русла, что в последующем способствовало добавлению исследования в клинические рекомендации американского и европейского общества кардиологов [14, 15].

КТ-определение фракционного резерва кровотока

Несмотря на высокую эффективность коронарографии в определении гемодинамически значимых стенозов, периодически возникают ситуации, когда специалисту трудно сказать, необходимо ли проведение баллонной ангиопластики со стентированием или нет, для упрощения принятия решения и повышения точности диагностики предложен дополнительный метод оценки коронарного русла – определение фракционного резерва кровотока (ФРК) [16]. В связи с высокой точностью метод быстро стал «золотым стандартом» в диагностике гемодинамически значимых поражений коронарного русла [17].

В 2010-е годы появилась возможность оценки ФРК при проведении КТ-коронарографии [18]. Данный метод повышает точность КТ-коронарографии, что позволяет избежать ненужных инвазивных вмешательств для исключения гемодинамически значимых стенозов [19, 20].

Использование искусственного интеллекта и других новых технологий в КТ

Развитие КТ не стоит на месте – продолжают поиск и разработка новых подходов, уменьшающих лучевую нагрузку, время проведения исследования, а также улучшающих разрешающую способность полученных изображений и применение технологий искусственного интеллекта для постобработки снимков и разработки новых методов анализа результатов [21].

Особую роль в текущих разработках занимает применение искусственного интеллекта и машинного обучения. Эти методы для оценки степени тяжести стеноза по данным КТ-ангиографии активно изучаются по всему миру. Например, в последние годы ученые рассмотрели возможность применения искусственного интеллекта для оценки значимости пограничных стенозов по данным КТ-ангиографии [22]. В исследовании для оценки значимости стенозов использовались системы машинного обучения. Всем испытуемым в качестве контроля проводилась оценка ФРК. По результатам исследования применение систем машинного обучения повышало специфичность КТ-ангиографии более чем на 15% в сравнении с обычной оценкой степени тяжести стеноза (48,4% против 31,1%). Во всех исследованиях применение искусственного интеллекта и систем машинного обучения показало лучшие результаты, нежели рутинное определение КТ-ФРК [23–26].

В нашей стране применение современных технологий в КТ также активно внедряется в клиническую практику.

Например, группа исследователей из ФГАОУ ВО «Первый МГМУ им. И.М. Сеченова» (Сеченовский Университет) разработала метод цифровой оценки КТ-ФРК, которая обладает высоким уровнем точности и может использоваться на практике [27, 28].

Приведенные выше примеры говорят о высоком потенциале применения искусственного интеллекта для диагностики ишемии и гемодинамически значимого стенозирования коронарных артерий, что может сделать КТ-ангиографию в будущем основным методом выявления значимых стенозов в коронарном русле, уменьшив нагрузку на рентгенооперационные необоснованными коронароангиографиями.

Оценка индекса снижения содержания жира

В последние годы разработан новый метод оценки степени тяжести коронарных стенозов – оценка развития периваскулярной жировой ткани и определение fat attenuation index – индекса снижения содержания жира. Периваскулярная жировая ткань является биосенсором воспаления стенки сосудов, которое, по современным гипотезам, является одним из ведущих механизмов роста атеросклеротических бляшек и развития атеросклероза. Для оценки степени воспаления стенки на основе периваскулярной жировой ткани разработан КТ-маркер fat attenuation index. С его помощью возможно определить риск роста и развития атеросклеротической бляшки, а значит, и применить необходимые меры профилактики [29].

Оценка перфузии

Другим развивающимся направлением в применении КТ в кардиологии является оценка миокардиальной перфузии. Для ее проведения требуется то же контрастное вещество, что и для КТ-ангиографии, и данные методики возможно применять совместно. Оценка перфузии при проведении КТ-ангиографии повышает чувствительность метода для оценки ишемии миокарда [30]. Например, в исследовании, проведенном группой под руководством Magalhães, показано, что чувствительность КТ-ангиографии с оценкой перфузии выше, чем «изолированной» КТ-ангиографии (73% против 54%) [31]. Методика оценки на данный момент имеет множество ограничений, связан-

ных во многом с большим количеством артефактов при проведении исследования [32].

В последние несколько лет активное развитие в КТ получила технология Photon-counting, с помощью которой можно значительно улучшить разрешение изображения, повысить качество визуализации мягких тканей, а также избавиться от посторонних шумов [33]. Применение этой технологии в КТ-ангиографии значительно улучшило качество и диагностическую ценность полученных изображений, что в будущем может уменьшить количество необоснованных коронарографий [34].

Заключение

КТ – это современный высокоинформативный неинвазивный метод диагностики, широко применяющийся в кардиологии, который продолжает активно развиваться и совершенствоваться за счет внедрения новых технологий обработки и анализа получаемых изображений.

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

Disclosure of interest. The authors declare that they have no competing interests.

Вклад авторов. Авторы декларируют соответствие своего авторства международным критериям ICMJE. Все авторы в равной степени участвовали в подготовке публикации: разработка концепции статьи, получение и анализ фактических данных, написание и редактирование текста статьи, проверка и утверждение текста статьи.

Authors' contribution. The authors declare the compliance of their authorship according to the international ICMJE criteria. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Источник финансирования. Авторы декларируют отсутствие внешнего финансирования для проведения исследования и публикации статьи.

Funding source. The authors declare that there is no external funding for the exploration and analysis work.

Список сокращений

КТ – компьютерная томография

ФРК – фракционный резерв кровотока

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Röntgen WC. Ueber eine neue Art von Strahlen. *Physmed Gesellschaft*. 1895.
2. Frost EB. Experiments on the X-rays. *Science*. 1896;3(59):235-6.
3. Radon J. Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte langs gewisser Mannigfaltigkeiten. *Berichte Saechsische Akademie der Wissenschaften*. 1917;69:262-79.
4. Cormack AM. Representation of a function by its line integrals, with some radiological applications. *J Appl Phys*. 1963;34(9):2722-7.
5. Hounsfield GN. Method of an apparatus for examining a body by radiation such as x or gamma radiation. *Instrumentation related to nuclear science and technology (e4100)*. 1975.
6. Терновой С.К., Синицын В.Е. Перспективы развития методов лучевой диагностики. Аналитический обзор. 2007. Режим доступа: <https://rosoncower.ru/library/radiodiagnostics/002.php>. Ссылка активна на 06.06.2022 [Ternovoy SK, Sinitsyn VE. Prospects for the development of radiation diagnostic methods. Analytical review. 2007. Available at: <https://rosoncower.ru/library/radiodiagnostics/002.php>. Accessed: 06.06.2022 (in Russian)].
7. Haschek E, Lindenthal OT. Ein Beitrag zur praktischen Verwerthung der Photographie nach Röntgen. *Wien Klin Wochenschr*. 1896;9:63-4.
8. Heuser C. A Chair for Radio-Therapeutic Treatment of the Perineum in a Seated Position. *Br J Radiol: BIR Section*. 1925;30(296):109-13.
9. Burnett HF, Parnell CL, Williams GD, Campbell GS. Peripheral arterial injuries: a reassessment. *Ann Surg*. 1976;183(6):701. DOI:10.1097/0000658-197606000-00014
10. Berk ME. Arteriography in peripheral trauma. *Clin Radiol*. 1963;14(2):235-9. DOI:10.1016/S0009-9260(63)80094-X
11. Forssmann W. Die sondierung des rechten herzens. *Klinische Wochenschrift*. 1929;8(45):2085-7.
12. Mason Sones F. Cine-Cardio-Angiography. *Pediatric Clinics of North America*. 1958;5(4):945-79. DOI:10.1016/S0031-3955(16)30724-6

13. Kalender WA, Seissler W, Klotz E, Vock P. Spiral volumetric CT with single-breath-hold technique, continuous transport, and continuous scanner rotation. *Radiology*. 1990;176(1):181-3. DOI:10.1148/radiology.176.1.2353088
14. Knuuti J, Wijns W, Saraste A, et al. 2019 ESC Guidelines for the diagnosis and management of chronic coronary syndromes: The Task Force for the diagnosis and management of chronic coronary syndromes of the European Society of Cardiology (ESC). *Eur Heart J*. 2020;41(3):407-77. DOI:10.1093/eurheartj/ehz425
15. Gulati M, Levy P, Mukherjee D, et al. 2021 AHA/ACC/ASE/CHEST/SAEM/SCCT/SCMR Guideline for the Evaluation and Diagnosis of Chest Pain. *J Am Coll Cardiol*. 2021;78(22):e187-285. DOI:10.1016/j.jacc.2021.07.053
16. De Bruyne B, Sarma J. Fractional flow reserve: a review. *Heart*. 2008;94(7):949-59. DOI:10.1136/hrt.2007.122838
17. Brueren BRG, Ten Berg JM, Suttrop MJ, et al. How good are experienced cardiologists at predicting the hemodynamic severity of coronary stenoses when taking fractional flow reserve as the gold standard. *Int J Cardiovasc Imaging*. 2002;18(2):73-6. DOI:10.1023/A:1014638917413
18. Taylor CA, Fonte TA, Min JK. Computational fluid dynamics applied to cardiac computed tomography for noninvasive quantification of fractional flow reserve: scientific basis. *J Am Coll Cardiol*. 2013;61(22):2233-41. DOI:10.1016/J.JACC.2012.11.083
19. Cook CM, Petraco R, Shun-Shin MJ, et al. Diagnostic accuracy of computed tomography-derived fractional flow reserve: a systematic review. *JAMA cardiol*. 2017;2(7):803-10. DOI:10.1001/jamacardio.2017.1314
20. Nørgaard BL, Fairbairn TA, Safian RD, et al. Coronary CT Angiography-derived Fractional Flow Reserve Testing in Patients with Stable Coronary Artery Disease: Recommendations on Interpretation and Reporting. *Radiol Cardiothorac Imaging*. 2019;1(5):e190050. DOI:10.1148/ryct.2019190050
21. Lell MM, Kachelrieß M. Recent and upcoming technological developments in computed tomography: high speed, low dose, deep learning, multienergy. *Invest Radiol*. 2020;55(1):8-19. DOI:10.1007/S00330-019-06183-Y
22. van Hamersvelt RW, Zreik M, Voskuil M, et al. Deep learning analysis of left ventricular myocardium in CT angiographic intermediate-degree coronary stenosis improves the diagnostic accuracy for identification of functionally significant stenosis. *Eur Radiol*. 2019;29:2350-9. DOI:10.1007/s00330-018-5822-3
23. Zreik M, van Hamersvelt RW, Khalili N, et al. Deep learning analysis of coronary arteries in cardiac CT angiography for detection of patients requiring invasive coronary angiography. *IEEE Trans Med Imaging*. 2019;39(5):1545-57. DOI:10.1109/TMI.2019.2953054
24. Wang ZQ, Zhou YJ, Zhao YX, et al. Diagnostic accuracy of a deep learning approach to calculate FFR from coronary CT angiography. *J Geriatr Cardiol*. 2019;16(1):42-8. DOI:10.11909/j.issn.1671-5411.2019.01.010
25. Tesche C, De Cecco CN, Baumann S, et al. Coronary CT angiography-derived fractional flow reserve: machine learning algorithm versus computational fluid dynamics modeling. *Radiology*. 2018;288(1):64-72. DOI:10.1148/radiol.2018171291
26. Coenen A, Kim YH, Kruk M, et al. Diagnostic accuracy of a machine-learning approach to coronary computed tomographic angiography-based fractional flow reserve: result from the MACHINE consortium. *Circulation: Cardiovasc Imaging*. 2018;11(6):e007217. DOI:10.1161/CIRCIMAGING.117.007217
27. Василевский Ю.В., Гамилов Т.М., Симаков С.С., и др. Вычислительная технология неинвазивной диагностики стенозов коронарных артерий пациентов с ишемической болезнью сердца. Биотехнология: состояние и перспективы развития: материалы международного конгресса. Москва, 26–29 октября 2021 года. М.: Экспо-биохим-технологии, 2021; с. 132-3 [Vasilevskii YuV, Gamilov TM, Simakov SS, et al. Computational technology for non-invasive diagnosis of coronary artery stenosis in patients with ischemic heart disease. Biotechnology: state of the art and perspectives. Moscow, 26–29 October 2021. Moscow: Ekspo-biokhim-tehnologii, 2021; p. 132-3 (in Russian)]. DOI:10.37747/2312-640X-2021-19-132-133
28. Simakov SS, Gamilov TM, Liang F, et al. Numerical evaluation of the effectiveness of coronary revascularization. *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling*. 2021;36(5):303-12. DOI:10.1515/rnam-2021-0025
29. Klüner LV, Oikonomou EK, Antoniadis C. Assessing cardiovascular risk by using the fat attenuation index in coronary CT angiography. *Radiology: Cardiovasc Imaging*. 2021;3(1):e200563. DOI:10.1148/RYCT.202100563
30. Ngam PI, Ong CC, Chai P, et al. Computed tomography coronary angiography – past, present and future. *Singapore Med J*. 2020;61(3):109. DOI:10.11622/SMEDJ.2020028
31. Magalhães TA, Kishi S, George RT, et al. Combined coronary angiography and myocardial perfusion by computed tomography in the identification of flow-limiting stenosis – the CORE320 study: an integrated analysis of CT coronary angiography and myocardial perfusion. *J Cardiovasc Comput Tomogr*. 2015;9:438-45. DOI:10.1016/j.jcct.2015.03.004
32. Rajiah P, Abbasa S, Halliburton SS. Spectral detector CT for cardiovascular applications. *Diagn Interv Radiol*. 2017;23(3):187. DOI:10.5152/dir.2016.16255
33. Taguchi K, Iwanczyk JS. Vision 20/20: Single photon counting x-ray detectors in medical imaging. *Med Phys*. 2013;40(10):100901. DOI:10.1118/1.4820371
34. Si-Mohamed SA, Boccalini S, Lacombe H, et al. Coronary CT angiography with photon-counting CT: first-in-human results. *Radiology*. 2022;211780. DOI:10.1148/radiol.211780

Статья поступила в редакцию / The article received: 04.07.2022



OMNIDOCTOR.RU