

## АЛГОРИТМЫ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ОЦЕНКИ ИЗВИТОСТИ МАГИСТРАЛЬНЫХ СОСУДОВ

А. А. Ильина<sup>1,2</sup>✉, И. А. Лакман<sup>2</sup>, А. Т. Бикмеев<sup>3</sup>, А. Р. Еникеева<sup>1</sup>, Е. А. Бадькова<sup>1</sup>, Н. Ш. Загидуллин<sup>1</sup>, О. А. Брюханова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Башкирский государственный медицинский университет, Уфа, Россия

<sup>2</sup> Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

<sup>3</sup> Институт механики имени П. Р. Мавлютова, Уфимский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Уфа, Россия

Извитость коронарных, цереброваскулярных артерий, аорты и ее ветвей остается одной из значимых сосудистых проблем, которая с одной стороны осложняет выбор тактики рентгенохирургического лечения, а с другой — ухудшает прогноз самого заболевания. Отсутствие единых стандартов оценки извитости коронарных, цереброваскулярных артерий, аорты и ее ветвей снижает точность диагностики пациентов с высоким риском сердечно-сосудистых событий. Одним из возможных решений данной проблемы является применение машинного обучения для автоматической оценки извитости. Целью исследования было провести анализ и сравнение точности, клинической применимости и ограничений существующих методов автоматической оценки извитости коронарных, цереброваскулярных артерий, аорты и ее ветвей с использованием инструментов машинного обучения. Систематический обзор проводили по протоколу PRISMA с поиском статей в базах данных PubMed, Scopus и eLibrary за период с 2015 по 2025 гг. по ключевым словам: deep learning, machine learning, artificial intelligence, vessel tortuosity, curvature. Из 240 выявленных публикаций в анализ было включено шесть. Анализ показал, что 80% подходов основаны на сверточных нейронных сетях, обязательным этапом предобработки изображений является скелетирование для отсеивания мелких сосудов от артерии. В 50% статей извитость артерий определяется качественно по наличию углов изгибов более 45°. Количественно извитость определяли как коэффициент расстояния и мера кривизны. Верификацию оценок в трех из шести исследований проводили при сравнении результатов с мнениями экспертов (точность составила 0,92–0,94). Ограничения исследования — моноцентричность, использование данных одного типа оборудования.

**Ключевые слова:** извитость сосудов, коронарные артерии, цереброваскулярные артерии, аорта и ее ветви, машинное обучение, искусственный интеллект, количественная мера оценки извитости

**Вклад авторов:** А. А. Ильина, А. Т. Бикмеев — поиск источников, написание статьи; И. А. Лакман — дизайн исследования, обработка данных, написание и редактирование статьи; А. Р. Еникеева, Е. А. Бадькова — эксперты ручного отбора публикаций, Н. Ш. Загидуллин — эксперт ручного отбора публикаций, написание и редактирование статьи, О. А. Брюханова — редактирование статьи.

✉ **Для корреспонденции:** Анастасия Александровна Ильина  
ул. Ленина, д. 3, г. Уфа, 450008, Россия; anastasiailina35@gmail.com

**Статья получена:** 22.12.2025 **Статья принята к печати:** 26.01.2026 **Опубликована онлайн:** 05.02.2026

**DOI:** 10.24075/vrgmu.2026.005

**Авторские права:** © 2026 принадлежат авторам. **Лицензиат:** РНИМУ им. Н. И. Пирогова. Статья размещена в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии Creative Commons Attribution (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## ARTIFICIAL INTELLIGENCE ALGORITHMS FOR ASSESSMENT OF THE MAJOR VESSEL TORTUOSITY

Ilina AA<sup>1,2</sup>✉, Lakman IA<sup>2</sup>, Bikmeyev AT<sup>3</sup>, Enikeeva AR<sup>1</sup>, Badykova EA<sup>1</sup>, Zagidullin NSh<sup>1</sup>, Bryukhanova OA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Bashkir State Medical University, Ufa, Russia

<sup>2</sup> Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

<sup>3</sup> Mavlyutov Institute of Mechanics, Ufa Federal Research Center of Russian Academy of Science, Ufa, Russia

Tortuosity of the coronary, cerebral arteries, aorta and its branches remains an important vascular problem, which, on the one hand, complicates selection of the X-ray surgical treatment tactics, and on the other hand worsens the disease outcome. The lack of common standards for assessment of tortuosity of the coronary, cerebral arteries, aorta and its branches reduces the diagnosis accuracy in patients at high risk of cardiovascular events. The use of machine learning for automated tortuosity assessment represents one possible solution to this problem. The study aimed to analyze and compare accuracy, feasibility, and limitations of the available methods for automated assessment of tortuosity of the coronary, cerebral arteries, aorta and its branches using the machine learning tools. The systematic review was conducted in accordance with the PRISMA protocol. The search for papers published in 2015–2025 in the PubMed, Scopus, and eLibrary databases was performed using the following keywords: deep learning, machine learning, artificial intelligence, vessel tortuosity, curvature. Six papers out of 240 were included in the analysis. The analysis has shown that 80% of approaches are based on convolutional neural networks, and skeletonization aimed to isolate small blood vessels from the artery represents an essential preprocessing phase. In 50% of papers, tortuosity was determined qualitatively based on the presence of bending angles over 45°. Quantitatively, tortuosity was determined as a distance coefficient and a measure of curvature. In three studies out of six, verification of estimates was carried out by comparing the results with expert opinions (accuracy was 0.92–0.94). The study limitations are as follows: monocentricity, the use of data from one type of equipment.

**Keywords:** vessel tortuosity, coronary arteries, cerebral arteries, aorta and its branches, machine learning, artificial intelligence, tortuosity index

**Author contribution:** Ilina AA, Bikmeyev AT — search for papers, manuscript writing; Lakman IA — study design, data processing, manuscript writing and editing; Enikeeva AR, Badykova EA — experts in manual selection of papers, Zagidullin NSh — expert in manual selection of papers, manuscript writing and editing; Bryukhanova OA — manuscript editing.

✉ **Correspondence should be addressed:** Anastasia A. Ilina  
Lenina, 3, Ufa, 450008, Russia; anastasiailina35@gmail.com

**Received:** 22.12.2025 **Accepted:** 26.01.2026 **Published online:** 05.02.2026

**DOI:** 10.24075/brsmu.2026.005

**Copyright:** © 2026 by the authors. **Licensee:** Pirogov University. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Сильная извитость артерий вызывает проблемы по нескольким причинам: во-первых, извитые артерии могут создавать турбулентное и замедленное движение крови, приводящее к снижению эффективности кровоснабжения тканей и органов [1]; во-вторых, может возникать повышенная нагрузка на стенку сосуда из-за неравномерности распределения давления в сосуде, в итоге приводящая к повреждению эндотелия [2]; в-третьих, возникают сложности с диагностикой (например, при ангиографии) и хирургическим вмешательством на сосуды [3]. При этом стандартные методы визуализации и оценка на их основе извитости артерий вызывают споры [4].

Сердечно-сосудистые заболевания, связанные с патологией коронарных артерий, остаются одной из ведущих причин преждевременной смертности по всему миру [5]. Лучевая диагностика играет ключевую роль в их выявлении, а коронарная ангиография признана золотым стандартом благодаря высокой точности визуализации анатомии сосудов [6]. Существующие методы диагностики обычно не фокусируются на оценке извитости коронарных артерий, несмотря на наличие возможной связи ее с неблагоприятными исходами, такими как ишемия, спонтанное расслоение сосудов и осложнения при стентировании [7].

Отсутствие единого стандарта оценки и тяжести извитости артерий ограничивает точность диагностики [8]. Помочь в решении этого вопроса теоретически могли бы алгоритмы машинного обучения, в частности алгоритмы машинного зрения, широко применяемые в задачах распознавания рентгенологических изображений [9]. Однако существует множество сложностей, позволяющих обучить интеллектуальные алгоритмы на практике. Так, технические особенности коронарной ангиографии, в том числе использование ограниченного числа стандартных проекций, не позволяют получить полное представление об анатомии сосудистого русла. Визуализацию осложняют также наложение сосудов, их тени, наличие мелких ветвей и костных структур, перекрывающих изображение. Дополнительные трудности создают артефакты, связанные с движением сердца и дыханием пациента, а также непостоянная скорость и неравномерность заполнения сосудов контрастным веществом [10]. Соответственно, возникает необходимость обобщения существующих исследований, позволяющая в дальнейшем оценить перспективность подходов, способных улучшить оценку извитости артерий, в частности коронарных артерий сердца.

Цель работы — анализ и сравнение точности, клинической применимости и ограничений существующих методов оценки извитости коронарных, цереброваскулярных артерий, аорты и ее ветвей с использованием инструментов машинного обучения.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для ответа на исследовательский вопрос «Как автоматически на основе медицинских изображений определить наличие и степень извитости артерий?» использовали протокол PRISMA, традиционно применяемый для проведения систематического обзора. Критерием поиска были исследования, опубликованные не ранее 2015 г. и посвященные интеллектуальным алгоритмам, методам и техникам, используемым для оценки извитости сосудов. Более ранние исследования не были рассмотрены в связи с потерей актуальности описываемых в них технологий. Обязательный критерий отбора — наличие доступа к полному тексту статьи.

Базами данных для поиска источников обзора служили PubMed, Scopus, eLibrary. Ключевые слова для поискового запроса публикаций на английском языке: *deep learning, machine learning, artificial intelligence, computer vision, coronary, cerebral, carotid, aorta, vessel, artery, tortuosity, curvature*. Соответственно ключевыми словами на русском языке служили: *извитость, сосуд, артерия, машинное обучение, компьютерное зрение, искусственный интеллект*. Поисковые запросы формировались с использованием логических операторов OR и AND для дезъюнктивного или конъюнктивного объединения терминов. Поиск публикаций в базах PubMed и Scopus осуществляли с помощью соответствующих библиотек R — *pubmedR* и *rscopus* (такая возможность имела, так как авторы статьи предварительно зарегистрировались в базах цитирования и получили доступ через API). Для более широкого поиска публикаций, согласно исследовательскому вопросу, использовали стратегию «метод снежного кома», когда находили нужную публикацию и проводили дополнительный поиск цитируемых в ней и цитирующих ее источников. Критерии включения на втором этапе отбора публикаций: наличие в них характеристик алгоритмов, методов и техник оценки извитости артерий, в том числе наличие точности и их применимости. Если в статье упоминались этапы предобработки и обработки изображений, их также включали в анализ. Критерии исключения: несоответствие тематике обзора (например, извитость сосудов пуповины). Ограничения исследований и источник их финансирования не учитывали при отборе публикаций. Соответствие каждой статьи критериям включения оценивали два независимых эксперта в ручном отборе публикаций. В случае появления разногласий в их мнении относительно какой-либо статьи привлекали верифицирующего эксперта. Согласие мнений эксперта определяли на основе альфы Кронбаха.

Критерии включения публикаций в систематический обзор: содержание описания и/или названия метода/техники оценки извитости (M-ТОИ); содержание описания результатов применения M-ТОИ; рассмотрение только артерий; анализ сосудов только взрослых пациентов со сформировавшейся сосудистой системой (от 18 лет); рассмотрение изображений сосудов, полученных с использованием коронарографии (КАГ), компьютерной томографии (КТ) или оптической когерентной томографии (ОКТ).

Критерии исключения: отсутствие результатов применения M-ТОИ; описание исследования извитости вен и/или сосудов пуповины; описание исследования сосудов пациентов в возрасте до 18 лет; описание исследования, проведенного на животных или с использованием моделей, таких как компьютерные симуляции и микрофлюидные устройства.

Анализ отобранных источников проводили со следующих позиций: какие виды изображений использовали для определения извитости артерий; какой объем числа изображений использовали для обучения алгоритмов машинного обучения; какой алгоритм машинного обучения использовали для распознавания изображений сосудов; каким образом проводили предобработку изображения сосудов; каким образом количественно измеряли извитость артерий; метрики качества оценки извитости.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Первичный поиск по заданной стратегии сочетания ключевых слов позволил найти 240 публикаций из трех

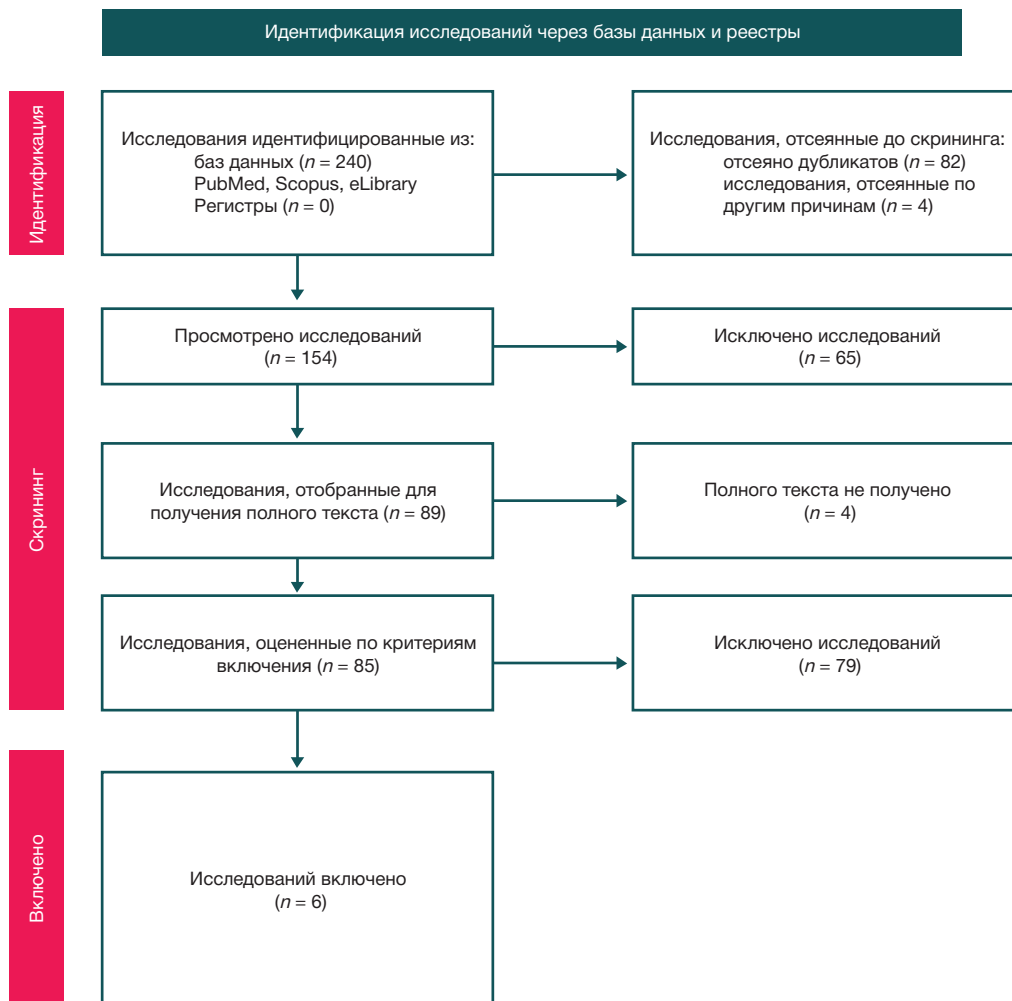


Рис. Схема PRISMA отбора публикаций в исследование

баз данных. На данном этапе отбора публикаций были исключены 82 дубликата исследований, и четыре статьи по другим причинам (отсутствие доступных полнотекстовых версий статей). Из оставшихся публикаций был сделан повторный отбор на соответствие названий статей и аннотаций ответу на исследовательский вопрос, который позволил исключить еще 69 исследований. Полнотекстовые версии отобранных публикаций были проанализированы в ручном отборе экспертами, при этом лишь одна публикация вызвала разногласия (альфа Кронбаха — 0,96). В результате из отобранных полнотекстовых статей только шесть отвечали на исследовательский вопрос, и для проведения анализа и сравнения алгоритмов, методов и техник, используемых для оценки извитости сосудов, было отобрано шесть публикаций. На рисунке представлена схема отбора публикаций согласно протоколу PRISMA.

В пяти из шести отобранных работ в качестве инструмента моделирования извитости артерий использовали сверточные нейронные сети. Так, в 2024 г. были обучены две модели сверточных нейронных сетей (CNN и nnU-Net) для автоматической сегментации коронарных артерий и количественной оценки их морфологических характеристик, включая извитость сосудов [11]. В данном исследовании проводили анализ КТ-ангиографических изображений 281 пациента. Предобработка входной информации включала пороговую фильтрацию с индивидуально подобранным экспертом

(врачом-рентгенологом) порогом для выделения просвета сосуда. В местах пере- и недосегментации изображений сосудов выполнялась ручная корректировка. Сегментацию сосудов осуществляли вручную в бесплатном открытом программном обеспечении для визуализации медицинских изображений 3D Slicer, после чего автоматически извлекали центральные линии сосудов (так называемый процесс скелетирования сосуда) с помощью библиотеки VMTK (Vascular Modeling Toolkit), интегрируемой в 3D Slicer, и рассчитывали основные морфологические признаки сосуда. Для оценки извитости артерии применяли несколько подходов. Глобальную извитость определяли как отношение фактической длины пути вдоль сосуда к прямому расстоянию между его концами. Локальную оценивали вдоль центральной линии в каждой точке с использованием опорных дуг длиной 1 см, центрированных в рассматриваемой точке. Дополнительно рассчитывали угол извитости как арккосинус скалярного произведения векторов, аппроксимирующих восходящий и нисходящий участки дуги сосуда методом наименьших квадратов. Итоговый индекс извитости анализируемых сосудов определяли для каждого пациента как количество сосудистых ветвей, содержащих не менее трех изгибов с углом  $\geq 45^\circ$ . В данном исследовании сверточная нейронная сеть (CNN) была обучена для автоматической сегментации сосудов, а для оценки морфологических характеристик использовали двухэтапный каскадный подход на базе нейронной сети nnU-Net [11]. На первом этапе создавали

многоакурсную 2.5D U-Net, для этого три 2D-модели были обучены на основе изображений, нарезанных в ортогональных направлениях (сагиттальном, корональном и аксиальном). Такой подход в анализе извитости сосудов особенно оправдан, так как извитость сосуда может быть обнаружена только в одной проекции, тогда как в другой проекции извитость не всегда заметна. Полученные данные на втором этапе соединяли с исходным изображением и использовали для обучения сети 3D U-Net. Примечательно, что авторы оценивали качество полученных результатов, для этого они сравнивали результаты многоакурсной 2.5D модели и каскадной 3D-модели. В результате усредненное по всем изображениям сосудов пациентов значение коэффициента Дайса как меры качества корректности распознавания изображений увеличилось с 0,791 [0,60; 0,88] до 0,895 [0,75; 0,92]. В качестве недостатка полученных результатов можно отметить то, что все изображения, использованные для обучения, были получены в одном центре, на одном и том же аппарате КТ. Использование данных из разных источников, в том числе открытых, включая изображения сосудов здоровых добровольцев, могло бы улучшить устойчивость модели извитости.

В 2023 г. также была предложена автоматическая методика сегментации, маркировки и оценки извитости артерий на основе искусственных нейронных сетей [12]. Для обучения моделей авторами был сформирован набор данных из 566 КТ-ангиографических снимков пациентов с острым ишемическим инсультом, из которого случайным образом было выбрано 165 изображений. На этапе предобработки выполняли пространственное выравнивание и нормализацию интенсивности. Сегментацию эксперты производили вручную, как и в предыдущем рассматриваемом решении, в 3D Slicer. Авторы тестировали три варианта моделей сегментации (на основе нейросетевых моделей nnU-Net, UNETR, SwinUNETR), при этом наибольшую эффективность показала nnU-Net (коэффициент Дайса составил  $0,93 \pm 0,02$ ). Обучение проводили с аугментацией данных и пятикратной кросс-валидацией (дополнительной кросс-проверкой). Далее из бинарной карты изображения, так же как и в работе [11], с помощью библиотеки VMTK извлекали поверхностную модель сосудов, после чего производили фильтрацию и сглаживание. На основе полученных центральных линий для каждого узла вычисляли 24 признака, включая радиусы (средний, проксимальный, дистальный, минимальный и максимальный), отношение проксимального к дистальному радиусу, относительную длину сегмента, направления (общее и начальное), число точек в сегменте, координаты центра масс сегмента. Из центральных линий сосудов авторы формировали граф, узлы которого обозначали сосудистые сегменты с указанием названий артерий. Классификацию сегментов проводили с помощью графовой нейронной сети graph U-Net после нормализации признаков и увеличения связности графа. Авторы исследования выделили и проанализировали 33 геометрических и морфологических признака сосудистой извитости. К ним относятся диаметры сосудов, относительные длины сегментов, а также абсолютные и относительные углы отклонения для основных артерий (аорта, плечеголовной ствол, общие сонные и подключичные артерии). Морфологические признаки включают тип аорты и наличие варианта «бычьей» аорты. Авторы не рассчитывали единый коэффициент извитости, а провели сравнительный анализ параметров

извитости у разных групп пациентов, разработав алгоритм, который позволял выявить anomalно извитые сосуды. Все использованные данные были получены из одного медицинского центра и одного производителя КТ-оборудования, что ограничивает обобщаемость результатов и универсальность метода. Автоматический анализ иногда допускал значительные ошибки в определении ключевых точек, что снижает надежность измерений по сравнению с ручным подходом. Основные источники ошибок связаны с неправильной маркировкой сосудов, неточностями сегментации, ошибками извлечения центральных линий и обработкой данных, что влияет на общую точность метода. Хотя при слепой валидации была получена точность распознавания 0,94.

В 2023 г. авторы другой работы также использовали сверточную нейронную сеть, но при этом предложили альтернативный подход к оценке сосудистой извитости, отличающийся от традиционного алгоритма последовательности действий [13]. Был разработан метод прямой классификации ангиографических изображений с применением сверточных нейронных сетей (CNN), которые определяют наличие или отсутствие извитости сосудов. Исходным материалом послужил набор данных из 658 снимков коронарной ангиографии, полученных от 401 пациента. Для расширения объема выборки использовали снимки в двух проекциях Spider (в виде снимков под случайным углом, образующим «паутину») и  $45^\circ$ . Из-за ограниченного количества данных использовали технологию аугментации изображений (масштабирование, сдвиг и изменение яркости изображений). В результате под извитостью авторы понимали наличие трех или более последовательных изгибов с углом  $\geq 45^\circ$  в любом участке коронарной артерии. Для сегментации изображений использовали сверточную нейронную сеть Xception с применением ранней остановки (early stopping), чтобы избежать переобучения алгоритма распознавания изображения. Для оптимизации задачи обучения алгоритма применили так называемое трансферное обучение (transfer learning), суть которого сводилась к следующему: в предобученной на ImageNet нейросетевой модели заменили последний полносвязный слой на адаптированный для задачи бинарной классификации. Такой подход позволил сохранить универсальные признаки из ImageNet и адаптировать их к специфике медицинских изображений. Для оценки качества предложенной модели были рассчитаны стандартные параметры: точность (0,87), чувствительность (0,87), специфичность (0,88). Основные ограничения предложенного метода связаны с качеством и разрешением изображений, недостаточным разнообразием снимков с различными типами извитости сосудов.

В том же году была разработана автоматическая методика классификации внутренней сонной артерии в зависимости от величины угла изгиба [14]. Для обучения алгоритмов использовали 379 КТ-ангиографических изображений. Для увеличения объема выборки в анализ включали как левую, так и правую внутреннюю сонную артерию каждого пациента. Как и в рассмотренных ранее исследованиях сегментацию выполняли вручную с помощью 3D Slicer с применением трех меток: аорта, левая общая сонная артерия (OCA) + внутренняя сонная артерия (BCA), правая OCA + BCA. Для автоматизации процесса сегментации артерий была обучена нейросеть с архитектурой nnU-Net, а затем применена гибридная сегментация, подразумевающая использование

Таблица. Характеристика исследований, включенных в систематический обзор

| Авторы, год исследования, ссылка | Тип анализируемых изображений | Методы предобработки изображений   | Методы обработки изображений  | Метод машинного обучения                                  | Характеристики выборки                          | Метод оценки извитости сосуда                         | Метрики качества моделей                                  |
|----------------------------------|-------------------------------|--|---|---|---|---|---|
| Nannini G. et al., 2024 [11]     | КТ-ангиография                | Пороговая фильтрация (threshold) с ручным подбором значения отсечения                                  | Сегментация сосудов вручную (3D Slicer), выделение центральных линий  | CNN, U-Net  | 281 пациент                                     | $\geq 3$ изгиба $> 45^\circ$ , коэффициент расстояния | Мера Дайса: 0,895   |
| Canals P. et al., 2023 [12]      | КТ-ангиография                | Пространственное выравнивание, нормализация интенсивности цвета  | Сегментация сосудов вручную (3D Slicer), анатомическая разметка, центральные линии, расчет морфологических и геометрических признаков | nnU-Net, gU-Net   | 566 пациентов с инсультом                       | Диаметр и длина сосудов, углы отклонения              | Нет   |
| Cobo M. et al., 2023 [13]        | Коронарная ангиография        | Кадрирование   | Нет   | Сверточная нейронная сеть (Xception)                      | 401 пациент, 658 изображений                    | $\geq 3$ изгиба с углом $\geq 45^\circ$               | Точность: 0,87, чувствительность 0,87, специфичность 0,88 |
| Nageler G. et al., 2023 [14]     | КТ-ангиография                | Нет  | Сегментация   | nnU-Net, 3D CNN   | 379 прошедших EVT острого окклюзивного инсульта | $< 90$ острые, $> 90$ тупые                           | AUC: 0,92   |
| Gao H. et al., 2022 [15]         | 3DRA ангиография              | Сегментация с помощью пороговой фильтрации, сглаживание, удаление несвязных ветвей, удаление аневризмы | Расчет геометрических признаков   | Логистическая регрессия, ENT, SVM, XGBoost, Random Forest | 226 пациентов, прошедших DSA исследование       | Кривизна, торсия, коэффициент расстояния              | Лучший AUC — 0,762 (SVM)                                  |
| Witherford M. et al., 2022 [16]  | КТ-ангиография                | Нет  | Создание 3D-модели сосудов  | —   | 234 пациента с аневризмой аорты                 | Коэффициент расстояния                                | —   |

автоматического предсказания с ручной верификацией и коррекцией.

Для измерения углов изгиба ВСА использовали инструмент angle в 3D Slicer, позволяющий более точно учитывать индивидуальное пространственное расположение сосудов. Углы классифицировали как острые ( $\leq 90^\circ$ ) или тупые ( $> 90^\circ$ ) в зависимости от их влияния на длительность эндоваскулярного вмешательства (углы  $\leq 90^\circ$  показали ассоциацию с более длительным временем эндоваскулярного вмешательства).

На этапе предобработки изображений для обучения модели выполнялись: обрезка объема по сегментации, разделение на левую и правую ВСА, унификация воксельного размера (0,5 мм), дополнение объема до  $400 \times 400 \times 605$  вокселей и рескейлинг (процедура, добавляющая пикселей и выполняющая сглаживание) до  $128 \times 128 \times 196$ . Входом для сети служила сегментация ОСА + ВСА, выходом — бинарный класс (угол  $> 90^\circ$  или угол  $\leq 90^\circ$ ). По результатам тестирования построенная авторами модель показала меру оценки классификатора AUC (площадь под ROC-кривой), равную 0,92. Основные ограничения исследования — моноцентрический дизайн, отсутствие валидации на внешних данных, плоскостное измерение углов на 3D-сегментациях и потеря информации при дихотомизации углов. Кроме того, некоторые сегменты ВСА невозможно было оценить из-за недостаточного контрастирования, что могло привести к смещению результатов.

В другом исследовании (2022) был проведен сравнительный анализ применимости нескольких

алгоритмов машинного обучения для оценки извитости внутренней сонной артерии [15]. В него были включены 3DRA-ангиографии 62 пациентов. На этапе предобработки выполняли сегментацию, сглаживание и удаление несвязанных ветвей сосудов с помощью Mimics и Geomagic Studio, после чего с использованием библиотеки VMTK автоматически устранялась аневризма для получения модели материнской артерии. Центральные линии рассчитывали в Aneufuse, а для оценки извитости использовали такие признаки, как: кривизна, торсия и коэффициент расстояния, рассчитанный как отношение прямого расстояния между начальной и конечной точками сегмента к длине центра линии. Вычисляли средние, максимальные и диапазонные значения кривизны и торсии. В итоге, на основе 75 клинично-анатомических и морфологических переменных была построена модель машинного обучения для предсказания развития внутристенного стеноза сосуда. Модель обучалась с использованием логистической регрессии и четырех алгоритмов машинного обучения: нейросети Elastic Net, машины опорных векторов, экстремального градиентного бустинга и случайного леса. При тестовой валидации лучшие параметры меры AUC-ROC были у алгоритма машины опорных векторов (SVM): 0,891 (на тестовом наборе) и 0,762 (на валидационном наборе). Среди параметров извитости наибольшее влияние на прогноз имели коэффициент длины и максимальная кривизна. Ключевые недостатки исследования — ограниченный объем выборки (62 пациента) и его ретроспективный

одноцентровый дизайн — снижают обобщаемость полученных данных. Анализ извитости проводили на глобальном уровне, без учета локальных особенностей сосуда, что могло повлиять на точность оценки связи с исходами лечения.

В 2022 г. был также проведен анализ предоперационной анатомии и интраоперационных деформаций артерий у пациентов с аневризмами аорты [16]. У 234 пациентов выполнили мультипланарную реконструкцию с последующим построением трехмерной модели сосудов. Создание моделей осуществляли с помощью проприетарного программного обеспечения CYDAR на основе предоперационной КТ, где отмечали ветвления основных артерий (чревный ствол, верхняя брыжеечная, почечные и подвздошные). Эти модели применяли для создания интерактивных карт в ходе операций, что позволяло в режиме реального времени корректировать позиции анатомических маркеров в трех плоскостях. Для оценки извитости сосудов были рассчитаны коэффициенты извитости как отношение длины прямого расстояния к евклидову расстоянию по ключевым сегментам: висцеральному отделу (от чревного ствола до нижней почечной артерии), общим подвздошным артериям и всему подвздошному сегменту. При проведении исследования авторы придерживались стандартов общества сосудистых хирургов для унификации измерений.

Для обобщения результатов анализа отобранных публикаций была построена таблица по основным характеристикам применяемых методов и алгоритмов по оценке извитости артерий.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенный систематический обзор позволил выделить шесть опубликованных исследований, отвечающих на исследовательский вопрос «Как автоматически на основе медицинских изображений определить наличие и степень извитости артерий?». Все исследования являются новейшими, и были опубликованы в период с 2022 по 2024 г. Авторы трех работ из шести рассматривали извитость внутренней сонной артерии и супрааортальных сосудов, в одной работе — аорты, в двух оценивали извитость коронарных артерий. В пяти из шести исследований в качестве основного алгоритма машинного обучения использовали нейронные сети, в 50% публикаций в качестве инструмента для предобработки использовали свободно распространяемое программное обеспечение для анализа медицинских (в первую очередь рентгенологических) изображений 3D Slicer. Во всех работах на предварительном этапе анализа изображений сосудов проводили их скелетирование, что особенно важно при распознавании и отделении магистральных сосудов от ветвей мелких сосудов, причем в трех работах из шести для этих целей использовали библиотеку с открытым кодом VMTK. Верификацию в трех из шести исследований проводили при сравнении результатов с мнениями экспертов.

Что касается ответа на сам исследовательский вопрос, только три работы рассматривали для количественного измерения извитости сосудов конкретное число в виде коэффициента расстояния, при этом в одной работе дополнительно рассматривали коэффициент кривизны (через вторую производную аппроксимированной функции, описывающей сосуд) и торсию (скрученность). В трех других работах извитость сосудов оценивали

на качественном уровне. Любая количественная оценка позволяет оценить степень извитости сосудов, но значение имеет также и автоматическая оценка самого наличия извитости как факта отклонения от нормы. Так, было показано, что наличие извитости коронарных артерий ассоциировано с ранней манифестацией артериальной гипертензии [17]. Кроме того, одним из важных значений автоматической оценки наличия извитости сосудов является планирование, мониторинг и оценка последствий хирургического вмешательства по поводу стентирования. Например, в 2021 г. на основе агрегации данных шести работ исследовали влияние факта наличия извитости сосудов на клинические последствия после установки стента, и были сделаны выводы о том, что имплантация стента в коронарные артерии с наличием извитости связана с увеличением частоты их тромбоза [18]. В работе еще одних авторов (2021) приводятся результаты исследования, доказывающие, что наличие коронарной извитости ассоциировано гипертонией, гиперлипидемией и диастолической дисфункцией левого желудочка сердца (примечательно, что факт извитости в этой работе определяли как наличие  $\geq 3$  изгибов под углом более  $45^\circ$ ) [19]. В то же время количественное измерение степени извитости позволяет оценить ее связь с изменениями коронарного потока, что может быть причиной снижения перфузионного давления и как следствие привести к ишемии миокарда [20]. Примечательно, что проводилось сравнение качественного и количественного подходов к оценке извитости с точки зрения их влияния на развитие ишемической болезни сердца (ИБС) [21]. На качественном уровне авторы определяли извитость за счет измерения углов, и ими было показано, что в группе пациентов с необструктивной ИБС чаще встречались пациенты с наличием извитости коронарных артерий. Количественное измерение извитости авторы определяли через индекс извитости, на основании которого было показано, что наибольший индекс извитости коронарных артерий был у пациентов с ишемией боковой стенки, кровоснабжаемой левой огибающей артерией. Был сделан вывод, что для выявления предикторов развития ишемической болезни сердца важна как качественная, так и количественная оценка извитости коронарных сосудов. В исследовании 2023 г. показано, что извитость цереброваскулярных артерий также влияет на образование бляшек (в луковиче сонной артерии) [21]. Кроме того, есть данные (2024), что фактором риска расслоения шейно-мозговой артерии, являющейся причиной ишемического инсульта в молодом возрасте, служит как раз их извитость [22], что еще раз подчеркивает необходимость автоматической оценки извитости артерий с использованием инструментов ИИ.

Применение моделей количественной оценки извитости артерий в клинической практике заключается прежде всего в возможности ее бесшовной интеграции в клинические шкалы стратификации риска осложнений при хирургических сосудистых вмешательствах, а также внедрение в виде отдельных модулей и системы поддержки принятия врачебных решений. Например, в шкалах SYNTAX Score и SYNTAX Score II учитывается извитость артерий, и, как показали работы отечественных авторов, их значения достоверно связаны с клиническими исходами у пациентов с тяжелым поражением коронарного русла после чрескожных коронарных вмешательств. В 2019 г. продемонстрировано, что более высокая анатомическая сложность коронарного русла, отражаемая значениями SYNTAX Score, ассоциирована

с худшим прогнозом в течение четырех лет наблюдения после ЧКВ [23]. По некоторым данным, у пациентов с высоким SYNTAX Score выбор методики реваскуляризации (ЧКВ или АКШ) оказывает существенное влияние на клинические исходы [24]. Но недостаток данных шкал в том, что оценка извитости остается субъективной. Учитывая, что извитость коронарных артерий напрямую влияет на геометрию сосудистого русла, сложность вмешательства, риск неполной реваскуляризации и тромбоза стента, автоматическую количественную оценку извитости с использованием методов искусственного интеллекта можно рассматривать как потенциальный дополнительный параметр, уточняющий анатомическую сложность поражения. Это открывает возможность для более объективной предоперационной стратификации пациентов, оптимизации выбора тактики реваскуляризации и, как следствие, снижения частоты ишемических и тромботических осложнений.

### Литература

- Baharoglu MI, Schirmer CM, Hoit DA, Gao BL, Malek AM. Aneurysm inflow-angle as a discriminant for rupture in sidewall cerebral aneurysms: morphometric and computational fluid dynamic analysis. *Stroke*. 2010; 41 (7): 1423–30. PMID: 20508183.
- Tawakul A, Alluqmani MM, Badawi AS, Alawfi AK, Alharbi EK, Aljohani SA, et al. Risk Factors for Cerebral Vasospasm After Subarachnoid Hemorrhage: A Systematic Review of Observational Studies. *Neurocrit Care*. 2024; 41 (3): 1081–99. PMID: 39048760.
- Callewaert BL, Willaert A, Kerstjens-Frederikse WS, De Backer J, Devriendt K, Albrecht B, et al. Arterial tortuosity syndrome: clinical and molecular findings in 12 newly identified families. *Hum Mutat*. 2008; 29 (1): 150–8. PMID: 17935213.
- Kim JH, Yang H, Son NH, Jang CK, Lee JW, Cho KC. Discrepancy in vessel tortuosity measurements of anterior circulation cerebral artery between digital subtraction angiography and magnetic resonance angiography. *J Cerebrovasc Endovasc Neurosurg*. 2025; 27 (3): 212–8. PMID: 40147427
- Nedkoff L, Briffa T, Zemedikun D, Herrington S, Wright FL. Global Trends in Atherosclerotic Cardiovascular Disease. *Clin Ther*. 2023; 45 (11): 1087–91. DOI: PMID: 37914585.
- Kheiri B, Simpson TF, Osman M, German DM, Fuss CS, Ferencik M, et al. Computed tomography vs invasive coronary angiography in patients with suspected coronary artery disease: a meta-analysis. *J Am Coll Cardiol Img*. 2022; 15 (12): 2147–9. PMID: 36481083.
- Kahe F, Sharfaei S, Pitliya A, Jafarizade M, Seifirad S, Habibi S, et al. Coronary artery tortuosity: a narrative review. *Coron Artery Dis*. 2020; 31 (2): 187–92. PMID: 31211725.
- Zebic MP, Arambasic J, Mlinarevic D, Saric S, Labor M, Bosnjak I, et al. Coronary Tortuosity Index vs. Angle Measurement Method for the Quantification of the Tortuosity of Coronary Arteries in Non-Obstructive Coronary Disease. *Diagnostics (Basel)*. 2023; 14 (1): 35. PMID: 38201343.
- Obuchowicz R, Lasek J, Wodziński M, Piórkowski A, Strzelecki M, Nurzynska K. Artificial Intelligence-Empowered Radiology-Current Status and Critical Review. *Diagnostics (Basel)*. 2025; 15 (3): 282. PMID: 39941212.
- Sun Z, Choo GH, Ng KH. Coronary CT angiography: current status and continuing challenges. *Br J Radiol*. 2012; 85 (1013): 495–510. PMID: 22253353.
- Nannini G, Saitta S, Baggiano A, Maragna R, Mushtaq S, Pontone G, Redaelli A. A fully automated deep learning approach for coronary artery segmentation and comprehensive characterization. *APL Bioeng*. 2024; 8 (1): 016103. PMID: 38269204.
- Canals P, Balocco S, Díaz O, Li J, García-Tornel A, Tomasello A, et al. A fully automatic method for vascular tortuosity feature extraction in the supra-aortic region: unraveling possibilities in stroke treatment planning. *Comput Med Imaging Graph*. 2023; 104: 102170. PMID: 36634467.
- Cobo M, Pérez-Rojas F, Gutiérrez-Rodríguez C, Heredia I, Maragaño-Lizama P, Yung-Manriquez F, et al. Novel deep learning method for coronary artery tortuosity detection through coronary angiography. *Sci Rep*. 2023; 13 (1): 11137. PMID: 37429940.
- Nageler G, Gergel I, Fangerau M, Breckwoldt M, Seker F, Bendzus M, et al. Deep Learning-based Assessment of Internal Carotid Artery Anatomy to Predict Difficult Intracranial Access in Endovascular Recanalization of Acute Ischemic Stroke. *Clin Neuroradiol*. 2023; 33 (3): 783–92. PMID: 36928398.
- Gao H, You W, Wei D, Lv J, Sun W, Li Y. Tortuosity of parent artery predicts in-stent stenosis after pipeline flow-diverter stenting for internal carotid artery aneurysms. *Front Neurol*. 2022; 13: 1034402. PMID: 36313497;
- Witthford M, Borghese O, Mastracci TM, Maurel B. An observational assessment of aortic deformation during infrarenal and complex endovascular aortic aneurysm repair. *J Vasc Surg*. 2022; 76 (3): 645–55.e3. PMID: 35367562.
- Еникеева А. Р., Бузаев И. В., Бадькова Е. А., Лакман И. А., Исхакова Ю. О., Бикмеев А. Т. и др. Факторы риска извитости коронарных артерий: оригинальное исследование. *Российский кардиологический журнал*. 2025; 30 (6): 18–24. DOI: 10.15829/1560-4071-2025-6045.
- Konigstein M, Ben-Yehuda O, Redfors B, Zhang Z, Kandzari DE, Hermiller JB, et al. Impact of Coronary Artery Tortuosity on Outcomes Following Stenting: A Pooled Analysis From 6 Trials. *JACC Cardiovasc Interv*. 2021; 14 (9): 1009–18. PMID: 33640388.
- Elamragy A, Yakoub S, AbdelGhany M, Ammar W. Coronary tortuosity relation with carotid intima-media thickness, coronary artery disease risk factors, and diastolic dysfunction: is it a marker of early atherosclerosis? *The Egyptian Heart Journal*. 2021; 73: 1–9. PMID: 33788058.
- Kahe F, Sharfaei S, Pitliya A, Jafarizade M, Seifirad S, Habibi S, et al. Coronary artery tortuosity: a narrative review. *Coronary artery disease*. 2020; 31 (2): 187–92. PMID: 31211725.
- Ren L, Xu R, Zhao C, Li W, Wang S, Cao C, et al. Tortuosity and Proximal-Specific Hemodynamics Associated with Plaque Location in the Carotid Bulb Stenosis. *J Vasc Res*. 2023; 60 (3): 160–71. PMID: 37499638.
- Salih M, Taussky P, Ogilvy CS. Association between cervicocerebral artery dissection and tortuosity — a review on quantitative and qualitative assessment. *Acta Neurochir (Wien)*. 2024; 166 (1): 285. DOI: 10.1007/s00701-024-06171-2. PMID: 38977512.
- Григорьев В. С., Петросян К. В., Абросимов А. В., Алякян Б. Г., Голухова Е. Э., Бузиашвили Ю. И., и др. Роль шкал SYNTAX Score и SYNTAX Score II в стратификации пациентов с тяжелым поражением коронарного русла в течение четырех лет наблюдения после выполнения ЧКВ. *Бюллетень НЦССХ*

### ВЫВОДЫ

Проведенный систематический обзор позволил обобщить возможности автоматической оценки извитости коронарных, цереброваскулярных артерий, аорты и ее ветвей. Извитость артерий влияет на тактику принятия решений при анализе изображений при проведении коронароангиографии, в частности, на возможность стентирования коронарных артерий либо шунтирования. В связи с этим автоматическая оценка извитости на качественном уровне важна для скорости принятия решений на операционном столе или в предоперационной. Автоматическая оценка количественной меры степени извитости коронарных артерий также важна, так как может быть использована в качестве предиктора развития неблагоприятных сердечно-сосудистых событий и церебро-васкулярных заболеваний.

им. А. Н. Бакулева РАМН. Сердечно-сосудистые заболевания. 2019; 20 (S11): 144.

24. Горбачев И. А., Голухова Е. З., Мерзляков В. Ю., Петросян К. В., Лукашкин М. А., Саломов М. А. Выбор методики

реваскуляризации миокарда у пациентов с многососудистым поражением коронарных артерий с высоким значением SYNTAX Score. Бюллетень НЦССХ им. А. Н. Бакулева РАМН. Сердечно-сосудистые заболевания. 2022; 23 (S3): 34.

## References

- Baharoglu MI, Schirmer CM, Hoit DA, Gao BL, Malek AM. Aneurysm inflow-angle as a discriminant for rupture in sidewall cerebral aneurysms: morphometric and computational fluid dynamic analysis. *Stroke*. 2010; 41 (7): 1423–30. PMID: 20508183.
- Tawakul A, Alluqmani MM, Badawi AS, Alawfi AK, Alharbi EK, Aljohani SA, et al. Risk Factors for Cerebral Vasospasm After Subarachnoid Hemorrhage: A Systematic Review of Observational Studies. *Neurocrit Care*. 2024; 41 (3): 1081–99. PMID: 39048760.
- Callewaert BL, Willaert A, Kerstjens-Frederikse WS, De Backer J, Devriendt K, Albrecht B, et al. Arterial tortuosity syndrome: clinical and molecular findings in 12 newly identified families. *Hum Mutat*. 2008; 29 (1): 150–8. PMID: 17935213.
- Kim JH, Yang H, Son NH, Jang CK, Lee JW, Cho KC. Discrepancy in vessel tortuosity measurements of anterior circulation cerebral artery between digital subtraction angiography and magnetic resonance angiography. *J Cerebrovasc Endovasc Neurosurg*. 2025; 27 (3): 212–8. PMID: 40147427
- Nedkoff L, Briffa T, Zemedikun D, Herrington S, Wright FL. Global Trends in Atherosclerotic Cardiovascular Disease. *Clin Ther*. 2023; 45 (11): 1087–91. DOI: PMID: 37914585.
- Kheiri B, Simpson TF, Osman M, German DM, Fuss CS, Ferencik M, et al. Computed tomography vs invasive coronary angiography in patients with suspected coronary artery disease: a meta-analysis. *J Am Coll Cardiol Img*. 2022; 15 (12): 2147–9. PMID: 36481083.
- Kahe F, Sharfaei S, Pitliya A, Jafarizade M, Seifirad S, Habibi S, et al. Coronary artery tortuosity: a narrative review. *Coron Artery Dis*. 2020; 31 (2): 187–92. PMID: 31211725.
- Zebic MP, Arambasic J, Mlinarevic D, Saric S, Labor M, Bosnjak I, et al. Coronary Tortuosity Index vs. Angle Measurement Method for the Quantification of the Tortuosity of Coronary Arteries in Non-Obstructive Coronary Disease. *Diagnostics (Basel)*. 2023; 14 (1): 35. PMID: 38201343.
- Obuchowicz R, Lasek J, Wodziński M, Piórkowski A, Strzelecki M, Nurzynska K. Artificial Intelligence-Empowered Radiology-Current Status and Critical Review. *Diagnostics (Basel)*. 2025; 15 (3): 282. PMID: 39941212.
- Sun Z, Choo GH, Ng KH. Coronary CT angiography: current status and continuing challenges. *Br J Radiol*. 2012; 85 (1013): 495–510. PMID: 22253353.
- Nannini G, Saitta S, Baggiano A, Maragna R, Mushtaq S, Pontone G, Redaelli A. A fully automated deep learning approach for coronary artery segmentation and comprehensive characterization. *APL Bioeng*. 2024; 8 (1): 016103. PMID: 38269204.
- Canals P, Balocco S, Díaz O, Li J, García-Tornel A, Tomasello A, et al. A fully automatic method for vascular tortuosity feature extraction in the supra-aortic region: unraveling possibilities in stroke treatment planning. *Comput Med Imaging Graph*. 2023; 104: 102170. PMID: 36634467.
- Cobo M, Pérez-Rojas F, Gutiérrez-Rodríguez C, Heredia I, Maragaño-Lizama P, Yung-Manriquez F, et al. Novel deep learning method for coronary artery tortuosity detection through coronary angiography. *Sci Rep*. 2023; 13 (1): 11137. PMID: 37429940.
- Nageler G, Gergel I, Fangerau M, Breckwoldt M, Seker F, Bendszus M, et al. Deep Learning-based Assessment of Internal Carotid Artery Anatomy to Predict Difficult Intracranial Access in Endovascular Recanalization of Acute Ischemic Stroke. *Clin Neuroradiol*. 2023; 33 (3): 783–92. PMID: 36928398.
- Gao H, You W, Wei D, Lv J, Sun W, Li Y. Tortuosity of parent artery predicts in-stent stenosis after pipeline flow-diverter stenting for internal carotid artery aneurysms. *Front Neurol*. 2022; 13: 1034402. PMID: 36313497;
- Witthof M, Borghese O, Mastracci TM, Maurel B. An observational assessment of aortic deformation during infrarenal and complex endovascular aortic aneurysm repair. *J Vasc Surg*. 2022; 76 (3): 645–55.e3. PMID: 35367562.
- Enikeeva AR, Buzaev IV, Badykova EA, Lakman IA, Iskhakova YuO, Bikmeev AT, i dr. Faktory riska izvitosti koronarnykh arterij: original'noe issledovanie. *Rossijskij kardiologicheskij zhurnal*. 2025; 30 (6): 18–24. DOI: 10.15829/1560-4071-2025-6045. Russian.
- Konigstein M, Ben-Yehuda O, Redfors B, Zhang Z, Kandzari DE, Hermiller JB, et al. Impact of Coronary Artery Tortuosity on Outcomes Following Stenting: A Pooled Analysis From 6 Trials. *JACC Cardiovasc Interv*. 2021; 14 (9): 1009–18. PMID: 33640388.
- Elamragy A, Yakoub S, AbdelGhany M, Ammar W. Coronary tortuosity relation with carotid intima-media thickness, coronary artery disease risk factors, and diastolic dysfunction: is it a marker of early atherosclerosis? *The Egyptian Heart Journal*. 2021; 73: 1–9. PMID: 33788058.
- Kahe F, Sharfaei S, Pitliya A, Jafarizade M, Seifirad S, Habibi S, et al. Coronary artery tortuosity: a narrative review. *Coronary artery disease*. 2020; 31 (2): 187–92. PMID: 31211725.
- Ren L, Xu R, Zhao C, Li W, Wang S, Cao C, et al. Tortuosity and Proximal-Specific Hemodynamics Associated with Plaque Location in the Carotid Bulb Stenosis. *J Vasc Res*. 2023; 60 (3): 160–71. PMID: 37499638.
- Salih M, Taussky P, Ogilvy CS. Association between cervicocerebral artery dissection and tortuosity — a review on quantitative and qualitative assessment. *Acta Neurochir (Wien)*. 2024; 166 (1): 285. DOI: 10.1007/s00701-024-06171-2. PMID: 38977512.
- Grigorev VS, Petrosyan KV, Abrosimov AV, Alekyan BG, Goluhova EZ, Buziashvili Yul, i dr. Rol'shkal SYNTAX Score i SYNTAX Score II v stratifikacii pacientov s tyazhelym porazheniem koronarnogo rusla v techenie chetyrekh let nablyudeniya posle vypolneniya CHKV. *Byulleten' NCSSKH im. A. N. Bakuleva RAMN. Serdechno-sosudistye zabolvaniya*. 2019; 20 (S11): 144. Russian.
- Gorbachev IA, Goluhova EZ, Merzlyakov VYu, Petrosyan KV, Lukashkin MA, Salomov MA. Vybor metodiki revaskulyarizacii miokarda u pacientov s mnogososudistym porazheniem koronarnykh arterij s vysokim znacheniem SYNTAX Score. *Byulleten' NCSSKH im. A. N. Bakuleva RAMN. Serdechno-sosudistye zabolvaniya*. 2022; 23 (S3): 34. Russian.