

ISSN 2782-3806
ISSN 2782-3814 (Online)
УДК 616.132-004.8

МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ И ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В ПРОГНОЗИРОВАНИИ, ДИАГНОСТИКЕ И ЛЕЧЕНИИ ЗАБОЛЕВАНИЙ ГРУДНОЙ АОРТЫ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ). ЧАСТЬ 2

Успенский В. Е., Сапранков В. Л., Мазин В. И., Филиппов А. А.,
Боярская Н. В., Малашичева А. Б., Моисеева О. М.

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский
исследовательский центр имени В. А. Алмазова» Министерства здравоохранения
Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

Контактная информация:

Успенский Владимир Евгеньевич,
ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава
России,
ул. Аккуратова, д. 2, Санкт-Петербург,
Россия, 197341.
E-mail: v.e.uspenskiy@gmail.com

Статья поступила в редакцию 05.04.2023
и принята к печати 20.04.2023.

РЕЗЮМЕ

Аневризма и расслоение грудной аорты, невзирая на относительно невысокую распространенность в сравнении с клапанными пороками и ишемической болезнью сердца, являются потенциально фатальными заболеваниями и представляют собой серьезные проблемы здравоохранения. Показания к хирургическому лечению большинства заболеваний грудной аорты устанавливаются преимущественно на основании максимального диаметра аорты в той или иной зоне. В качестве дополнительных факторов риска ассоциированных с аортой осложнений, влияющих на «ужесточение» показаний и снижение «порогового» значения диаметра аорты, рассматриваются врожденные дисплазии соединительной ткани, аномалии грудной аорты (например, коарктация аорты), семейный анамнез аневризм, расслоений аорты и внезапных смертей. Вместе с тем у определенной доли пациентов с аортопатиями расслоения и разрывы аорты развиваются при нормальном или близком к нормальному диаметру грудной аорты в том или ином отделе. На развитие заболеваний аорты и осложнений влияет множество факторов, и оценка вклада в этиологию и патогенез каждого из них непростая. Машинное обучение и математическое моделирование с использованием искусственного интеллекта — активно развивающееся направление компьютерных наук, которое находит применение и в медицине, в частности, в изучении, диагностике и лечении аневризм и расслоений грудной аорты. В статье рассмотрены современные методы анализа данных, прогнозирования развития аневризм и расслоений грудной аорты, планирования лечения заболеваний грудной аорты и предсказания осложнений с помощью машинного обучения и искусственного интеллекта.

Ключевые слова: аневризма грудной аорты, заболевания аорты, искусственный интеллект, компьютеры, распространенность, расслоение аорты, факторы риска.

Для цитирования: Успенский В.Е., Сапранков В.Л., Мазин В.И., Филиппов А.А., Боярская Н.В., Малашичева А.Б., Моисеева О.М. Машинное обучение и искусственный интеллект в прогнозировании, диагностике и лечении заболеваний грудной аорты (обзор литературы). Часть 2. Российский журнал персонализированной медицины. 2023;3(3):132-143. DOI: 10.18705/2782-3806-2023-3-3-132-143.

MACHINE LEARNING AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE PREDICTION, DIAGNOSIS AND TREATMENT OF THORACIC AORTIC DISEASES (LITERATURE REVIEW). PART 2

Uspenskiy V. E., Saprankov V. L., Mazin V. I., Filippov A. A., Boyarskaya N. V., Malashicheva A. B., Moiseeva O. M.

Almazov National Medical Research Centre, Saint Petersburg, Russia

Corresponding author:

Uspenskiy Vladimir E.,
Almazov National Medical Research
Centre,
Akkuratova str., 2, Saint Petersburg,
Russia, 197341.
E-mail: v.e.uspenskiy@gmail.com

Received 05 April 2023; accepted
20 April 2023.

ABSTRACT

Despite their relatively low prevalence compared to cardiac valve lesions and coronary heart disease, thoracic aortic aneurysm and dissection are potentially fatal and represent serious public health problems. The indications for surgical treatment in most thoracic aortic diseases are predominantly based on the maximum aortic diameter in a particular area. Congenital connective tissue disorder, thoracic aortic anomalies (e.g., coarctation), family history of aneurysms, aortic dissections, and sudden deaths are considered as additional risk factors of aortic-related complications influencing the “stricter” indications and lowering the “threshold” aortic diameter. At the same time, a certain proportion of patients with aortic diseases develop aortic dissection and rupture in normal or near-normal thoracic aortic diameter in certain section. Many factors influence the development of aortic diseases and complications, and assessing the contribution to the aetiology and pathogenesis of each factor is difficult. Machine learning and mathematical modeling using artificial intelligence is an actively developing area

of computer science, which also finds application in medicine, in particular in the study, diagnosis, and treatment of thoracic aortic aneurysms and dissections. This article discusses modern methods of data analysis, prediction of thoracic aortic aneurysms and dissections, treatment planning in thoracic aortic diseases, and prediction of complications using machine learning and artificial intelligence.

Key words: aortic aneurysm, aortic diseases, aortic dissection, artificial intelligence, computers, prevalence, risk factors, thoracic.

For citation: Uspenskiy VE, Saprankov VL, Mazin VI, Filippov AA, Boyarskaya NV, Malashicheva AB, Moiseeva OM. Machine learning and artificial intelligence in the prediction, diagnosis and treatment of thoracic aortic diseases (literature review). Part 2. Russian Journal for Personalized Medicine. 2023; 3(3):132-143. (In Russ.) DOI: 10.18705/2782-3806-2023-3-3-132-143.

Список сокращений: АК — аортальный клапан, ВА — восходящая аорта, ДАК — двустворчатый аортальный клапан, КТ — компьютерная томография, МРТ — магнитно-резонансная томография, ПЭТ — позитронно-эмиссионная томография, РКТА — рентгеновская компьютерно-томографическая ангиография, DICOM — Digital Imaging and Communications in Medicine (цифровая визуализация и коммуникации в медицине).

ЧАСТЬ 2. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ, ДИАГНОСТИКА И ЛЕЧЕНИЕ ЗАБОЛЕВАНИЙ ГРУДНОЙ АОРТЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Заболевания грудной аорты могут развиваться в любом возрасте, и у достаточно большой доли пациентов с аортопатиями невозможно выделить какой-либо однозначный предиктор или пусковой фактор. Если рассмотреть, например, лиц с ДАК, то приблизительно у 25 % в течение жизни сформируется аневризма грудной аорты и разовьются нарушения функции АК, требующие хирургического вмешательства [1]. Вместе с тем, во-первых, большая доля лиц с ДАК доживает до глубокой старости без каких-либо осложнений со стороны сердечно-сосудистой системы, во-вторых, у большинства пациентов, вошедших в эти 25 %, так же как и у множества лиц с нормально сформированным трехстворчатым клапаном аорты, непросто выделить какие-то отчетливые отдельные этиологические факторы заболевания аорты и осложнений. Изуча-

ется множество биомаркеров аортопатий, но в своем подавляющем большинстве они рутинно не применяются в повседневной клинической практике [2–4]. Во многом это связано со сложностью корректной экстраполяции данных, полученных в экспериментальных и клинических исследованиях на небольших группах, на общую когорту пациентов с аортопатиями и факторами риска последних. Что касается оперативного лечения заболеваний аорты, несмотря на общий прогресс сердечно-сосудистой хирургии, частота периоперационных осложнений и неблагоприятных исходов при хирургических операциях на грудной аорте на сегодняшний день превышает аналогичные значения при более «простых» операциях протезирования аортального клапана или коронарного шунтирования [5–7]. Так как комбинация этиопатогенетических факторов аневризм и расслоений грудной аорты представляет собой не цепочку, а, скорее, пазл, состоящий из множества компонентов, то в зависимости от расположения «потерянной» части головоломки (в центре или у края «картинки»), то есть значимости влияния утерянного компонента на нормальную структуру и функцию аорты, эффект исключения этого компонента может быть неодинаковым. Более того, кроме собственно отсутствия каких-то дискретных составляющих нормальной анатомии и физиологии аорты, нельзя забывать о взаимном влиянии этих составляющих, а также их «пограничных» изменений, которые сами по себе не должны существенно влиять на возникновение заболевания аорты, но в совокупности с другими факторами приводят к патологическим изменениям. Сложность и многокомпонентный характер этиопатогенеза аортопатий делают акту-

альным поиск новых методов анализа информации для прогнозирования развития этой группы заболеваний, максимально ранней и точной диагностики и выбора оптимального метода лечения.

Рентгенология — отрасль, в которой использование новых технологий развивается наиболее активно, в особенности после возникновения систем архивирования и передачи изображений [8]. Существующие методы получения изображений сосудистых структур при РКТА основаны на введении контрастного препарата для усиления рентгеновской плотности в просвете сосудов. Однако в сосудистой системе могут присутствовать патологические изменения, препятствующие точной реконструкции изображений. Во многих случаях, в основном при аневризме нисходящей аорты, внутри аневризматического мешка формируются тромботические наложения, препятствующие автоматическому извлечению важной клинической информации. Архитектура глубокого обучения, состоящая из модифицированной сети U-Net архитектуры, позволяет точно и эффективно выделять морфологические и патологические особенности всего объема аорты и может быть использована для стандартизации ведения пациентов с аневризмами аорты, а также закладывает основу для сложного геометрического и морфологического анализа [9]. Оценка изображений внутренних структур тела обычно выявляет доминирующую патологию пациента, но часто остается неясным, как отдельные составляющие изображений соотносятся с данными других пациентов с аналогичным заболеванием. Группировка пациентов по анатомическому сходству, с учетом истории болезни и других функциональных или итоговых параметров может в конечном счете позволить разработать уточненные, адаптированные к кластерам стратегии лечения и последующего наблюдения и помочь в стратификации риска при обследовании нового пациента с аналогичным диагнозом [10]. Одним из методов прогнозирования развития аневризмы грудной аорты является выявление аортопатии на ранних стадиях, до формирования значимого расширения или расслоения аорты. Это может быть осуществлено на основании изучения конфигурации аорты, кривизны и протяженности разных отделов, соотношения диаметров в разных отделах, то есть выявления определенных *паттернов* грудной аорты. Паттерн — термин, описывающий повторяющиеся события или визуальные объекты. Взаимодействующие между собой системы паттернов, во множестве встречающиеся в природе, обозначаются как сложные адаптивные системы. Растение, водопад, формирующийся и развивающийся организм — все это

сложные сочетания *паттернов*. Аорта также является сложной биомеханической системой, и в ряде ситуаций при исходно имеющихся нарушениях ее функционирования на микроскопическом уровне могут присутствовать определенные отличительные особенности (строения, эластических свойств и т. д.) — патологические *паттерны*. Такие *паттерны* могут быть выявлены, что, соответственно, делает возможным предсказание морфологически определенных и ассоциированных с высоким риском осложнений серьезных патологических изменений аорты [11–13]. В большинстве случаев машинного обучения проблема поиска *паттернов*, в наибольшей степени ассоциированных с заболеваниями грудной аорты, решается в процессе классификации. Исходная информация хранится в «обучающих образцах» — крупных наборах данных, которые используются в обучении алгоритма (машины). «Результат» — решение по определенной категории выборки, относится ли конкретный признак к патологическому *паттерну*. Например, при определенном исходном значении длины восходящего (от уровня АК до зоны отхождения брахиоцефального ствола) или нисходящего отделов грудной аорты (от уровня отхождения левой подключичной артерии до уровня диафрагмы) машина решает, ассоциировано ли это значение с вероятностью развития аневризмы или расслоения аорты в этой области, и соответствующим образом классифицирует образец по этому критерию: «аортопатия разовьется/не разовьется» [14].

Catalano С. и соавторы (2022 г.) для поиска связей между морфологическими и патофизиологическими особенностями оценили возможности изучения патологии сердечно-сосудистой системы на основе вероятностных атласов. Создание вероятностных атласов основано на статистическом моделировании формы для оценки ключевых анатомических особенностей у пациентов с патологическими расширениями восходящей аорты. На основании результатов РКТА аорты разрабатывались виртуальные модели расширенной аорты с последующей оценкой их планиметрических параметров для улучшения понимания этиопатогенеза аортопатии [15]. Bruse J. L. и коллеги (2017 г.) изучили эффективность иерархической кластеризации различных комбинаций расстояний/связей и различных типов входящих данных для получения клинически значимых кластеров формы. Они разработали технологию обработки, сочетающую автоматическую сегментацию, статистическое моделирование формы и иерархическую кластеризацию для автоматического разделения набора из 60 анатомических моделей дуги аорты на здоровую контрольную

группу и две группы с врожденными пороками (рис. 1). Результаты сравнивались с традиционной морфометрией и анализом главных компонент особенностей формы. Авторам удалось выделить клинически значимые кластеры и подгруппы форм с высокой специфичностью и низким уровнем ошибочной классификации, что может улучшить оценку риска на основе изображений, планирование лечения и разработку медицинского оборудования при сложных заболеваниях [10]. В общем, работу рентгенолога, анализирующего результаты РКТА аорты, могут существенно упростить алгоритмы автоматической сегментации и выявления расслоения восходящего и нисходящего отделов аорты, расчета ее диаметров в различных отделах [16–18], методы оценки «нормальности» аорты у отдельно взятого человека [19].

В зависимости от поставленной задачи, в качестве входящих данных, характеризующих грудную аорту, можно использовать не только результаты неинвазивной (РКТА) или инвазивной аортографии. Duff L. и соавторы (2022 г.), используя сложные методы машинного обучения, изучили возможности вспомогательной диагностики активного (пери-) аортита на основании результатов ПЭТ-КТ аорты с 18F-фтордезоксиглюкозой. Из сегментированных данных 50 пациентов с аортитом и 25 контрольных лиц было извлечено 107 рентгенологических признаков (сигнатур); отдельные признаки использовались в качестве входящих данных в классификаторах машинного обучения. Авторы выявили несколько сигнатур, позволявших с высокой точностью обнаруживать активный воспалительный процесс аорты, что может помочь в разработке

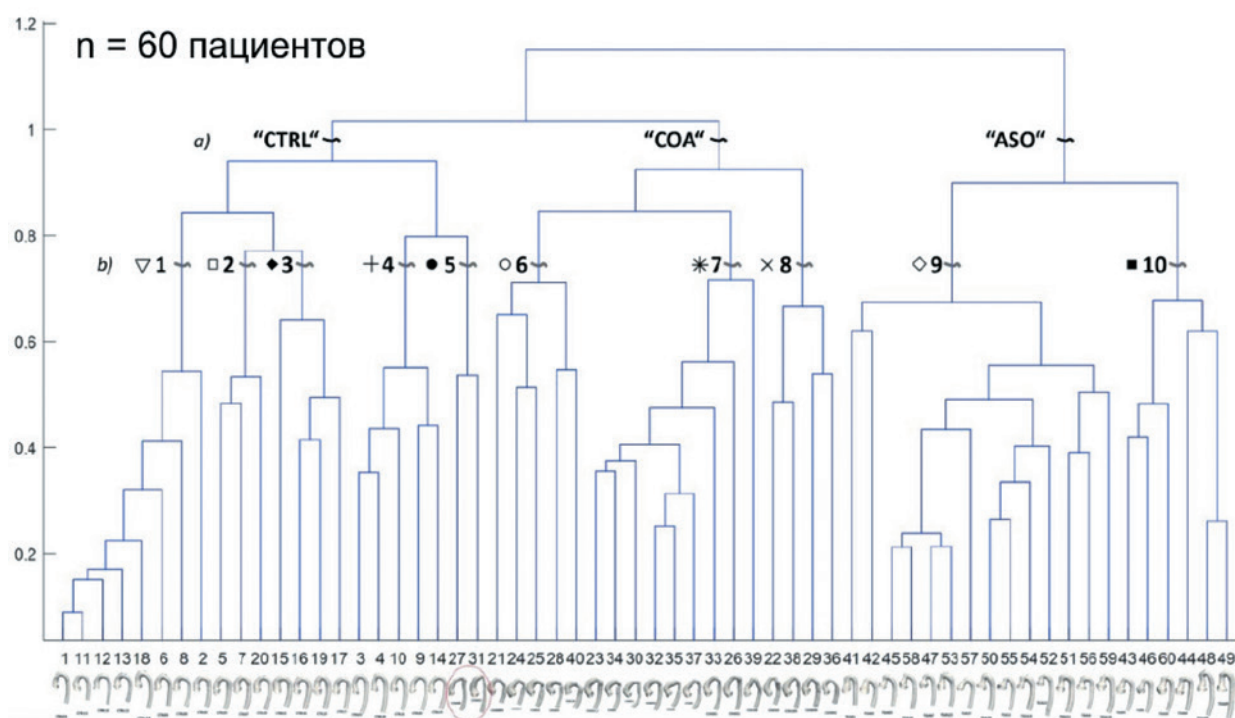


Рис. 1. Дендрограмма кластеризации по конфигурации дуги аорты на основании результатов МРТ (адаптировано из Bruse J. L. и др., 2017) [10]

Примечания: Значения оси X являются идентификаторами пациентов: CTRL (контрольная группа, пациенты 1–20), COA (состояние после хирургического устранения коарктации аорты, пациенты 21–40), ASO (состояние после операции артериального переключения, пациенты 41–60). Значения по оси Y отражают расстояния между исследуемыми, вычисленные функцией связи. Дендрограмма была автоматически разделена таким образом, что образовалось 3 больших кластера. В зависимости от большинства исследуемых, отнесенных к одному кластеру, последнему присваивалась соответствующая метка (CTRL, COA, ASO). Пациенты 27 и 31 были классифицированы неверно. Вторым этапом дендрограмма была разделена на более низком уровне для выявления подгрупп (1–10) внутри основных групп.

клинического инструмента принятия решений для более объективной и стандартизированной оценки аортита [20].

У лиц с двустворчатой и трехстворчатой АК существуют различия структуры гемодинамического потока крови, формирующегося при прохождении через АК, что оказывает неблагоприятное влияние на ВА в виде появления зон повышенного напряжения сдвига, приводящих к развитию аневризм и расслоений этого отдела аорты [21]. Такая ситуация обуславливает актуальность поиска новых гемодинамических «биомаркеров» для улучшения наблюдения и индивидуальной оценки рисков осложнений, ассоциированных с аортой. Franco P. и соавторы (2022 г.) проанализировали 16 параметров кровотока в восходящем отделе и дуге аорты на пике систолы по данным МРТ в режиме 4D flow для определения признаков, позволяющих точно классифицировать здоровых добровольцев и пациентов с ДАК с расширенной и нерасширенной восходящей аортой с помощью машинного обучения. В качестве алгоритмов для выбора признаков (*features*) были использованы последовательный прямой отбор и анализ главных компонент, далее применялись 11 классификаторов машинного обучения для разделения здоровых добровольцев и лиц с ДАК. Множественные коррелирующие паттерны извлекались методом иерархической кластеризации. Наиболее эффективными классификаторами оказались линейный дискриминантный анализ и случайный лес, с помощью которых было выделено 5 гемодинамических параметров, отобранных с помощью последовательного прямого отбора (угол скорости, антеградная скорость, степень завихрения и ретроградная скорость в восходящей аорте; плотность спиральности в дуге аорты) с точностью $96,31 \pm 1,76 \%$ и $96,00 \pm 0,83 \%$ соответственно. При иерархической кластеризации было выявлено три группы коррелирующих признаков. Авторы отметили, что признаки, отобранные с помощью последовательного прямого отбора, имеют лучшую вычислительную производительность, чем признаки, отобранные методом анализа главных компонент. На основе предложенного метода отбора признаков были обнаружены пять потенциальных гемодинамических биомаркеров, связанных с ДАК и расширением ВА [22]. Для определения индивидуального риска развития аневризмы, расслоения или разрыва аорты у пациентов с ДАК-ассоциированной аортопатией важным является выделение *паттернов* расширения ВА, каждый из которых характеризуется определенной вероятностью развития осложнений [23, 24].

Дополнительной задачей как для рентгенолога, так и для клинициста является анализ структур тела

человека, имеющих неодинаковые характеристики. Для оптимальной оценки анатомических структур и тканей, отличающихся по строению, целесообразно применять различные методы визуализации. Закономерным следствием являются дополнительные сложности при совместной интерпретации результатов исследований различной модальности, что может быть в определенной степени нивелировано использованием методов машинного обучения. Так как зоны кальциноза аорты лучше выявляются при РКТА, а тромботические наложения и мягкие ткани — при МРТ, объединение результатов этих исследований может существенно улучшить диагностику и прогнозирование течения заболеваний аорты. Wang D. и коллеги (2018 г.) предложили новый подход к объединению и анализу результатов этих исследований — мультимодальную сегментацию медицинских изображений с помощью нейронных сетей, основанную на предположении, что нейроны, распознающие высокоуровневые понятия аневризмы аорты, могут быть общими для нескольких модальностей (РКТА и МРТ). Результатом стало более быстрое обучение такой объединенной нейронной сети и улучшение диагностики заболеваний аорты [25]. Еще одним подходом к повышению точности анализа данных РКТА при расслоении аорты является многоступенчатая схема сегментации изображений для максимально корректного выделения «истинного» и «ложного» каналов, ветвей аорты, виртуального «выпрямления» аорты с использованием нескольких каскадных либо сверточных нейронных сетей [26, 27]. В похожих исследованиях на основании данных РКТА аорты и построения статистических моделей форм с последующим анализом разными методами машинного обучения и сверточными нейронными сетями были разработаны улучшенные алгоритмы сегментации аорты и система прогнозирования разрыва аневризмы ВА с целью персонализации принятия решения о плановом хирургическом лечении [28–31].

Применение методов машинного обучения и искусственного интеллекта в отношении ведения пациентов с заболеваниями грудной аорты не ограничивается анализом только лишь медицинских изображений, полученных на этапе обследования. Для больных с коарктацией аорты Nita C.-I. и соавторы (2021 г.) на основании результатов трехмерной ротационной ангиографии разработали методику виртуального гемодинамического моделирования, которая позволяет не только проводить полную гемодинамическую оценку, включая неинвазивный расчет давлений, но и виртуальные операции с прогностическим моделированием гемодинамического результата устранения коарктации [32]. На основа-

Таблица 1. Использование алгоритмов машинного обучения и методов искусственного интеллекта для прогнозирования, диагностики и лечения заболеваний аорты

Задача	Входящие данные	Метод машинного обучения	Источник
Прогнозирование и выявление заболевания грудной аорты			
Автоматическое определение анатомии грудной аорты и поиск предикторов осложнений	MPT (n = 60)	Анализ главных компонент, иерархическая кластеризация	Bruse J. L., 2017 [10]
Поиск связей между формой аорты и прогнозируемым риском разрыва аневризмы восходящей аорты	РКТА (n = 729)	Статистическая модель формы, анализ главных компонент, моделирование конечных элементов, линейная и логистическая регрессия, машина опорных векторов	Liang L., 2017 [28]
Мультимодальная сегментация изображений — объединение результатов РКТА и MPT	РКТА + MPT (n = 21)	Объединенная сверточная НС (раздельный анализ данных РКТА и MPT -> объединение промежуточных слоев из двух потоков, обрабатывающих признаки более высокого уровня для каждой модальности)	Wang D., 2018 [25]
Выделение паттернов расширения восходящей аорты, ассоциированных с ДАК	РКТА (n = 656)	Кластерный анализ, случайный лес	Wojnarski C. M., 2018 [24]
Улучшение и автоматизация сегментации расслоения аорты типа В	РКТА (n = 276)	Трехэтапная обработка с использованием 3 сверточных НС (U-Net архитектура): препроцессинг, процессинг с помощью трех НС, постпроцессинг	Cao L., 2019 [27]
Улучшенная трехмерная сегментация аорты	РКТА (n = 80)	Несколько последовательно выстроенных сверточных НС: 4 сети локализации (2D U-Net архитектура, 1 сеть предварительного анализа, 3 сети анализа изображений аксиальной, корональной и сагиттальной проекций), сеть слияния (2D вероятностные атласы с Гауссовым фильтром)	Fantazzini A., 2020 [29]
Автоматическое определение диаметра аорты	РКТА (n = 451)	Несколько последовательно выстроенных сверточных НС: сеть локализации (4 блока свертки, каждый состоящий из 3 сверточных слоев и 1 слоя обобщения-усреднения), сеть сегментации (V-Net архитектура, 9 сверточных слоев), сеть доработки сегментации (V-Net архитектура)	Adam C., 2021 [17]

Улучшение сегментации изображений, выделение истинного, ложного каналов, ветвей аорты, «выпрямление» аорты	РКТА (n = 120)	Две каскадные сверточные НС	Chen D., 2021 [26]
Оценка «нормальности» восходящей аорты	ЭхоКГ (n = 1112)	Линейная регрессия, одноклассовая машина опорных векторов, расчет традиционного Z-score и нового Q-score	Frasconi P., 2021 [19]
Прогнозирование разрыва стенки аорты	РКТА (n = 60), физические свойства аорты (n = 79)	Статистическая модель формы, анализ главных компонент, НС с двумя скрытыми слоями	Liu M., 2021 [30]
Улучшение диагностики и автоматизация извлечения информации	РКТА (n = 75)	Модифицированная U-Net архитектура с функцией привлечения внимания	Chandrashekar A., 2022 [9]
Сегментация данных РКТА и МРТ грудной аорты	РКТА (n = 1204), МРТ (n = 1345)	Двуслойная сверточная НС U-Net с заменяемыми ядрами модулем свертки X ResNet	Chen W., 2022 [31]
Выявление признаков активного (пери-)аортита	ПЭТ-КТ с 18F-ФДГ (n = 75)	Логистическая регрессия, метод опорных векторов, случайный лес, метод k-ближайшего соседа, перцептрон, многослойный перцептрон, дерево решений, классификация гауссовского процесса	Duff L., 2022 [20]
Гемодинамические маркеры ДАК и ассоциированного расширения восходящей аорты	МРТ в режиме 4D flow (n = 115)	Последовательный прямой отбор, анализ главных компонент, иерархическая кластеризация, линейный дискриминантный анализ и случайный лес	Franco P., 2022 [22]
Автоматическая сегментация расслоения аорты на типы А, В и отсутствие расслоения	РКТА (n = 130)	Двухуровневая иерархическая сверточная НС: выявление расслоения (U-Net архитектура), классификация расслоения по Stanford (ResNeXt архитектура)	Huang L. T., 2022 [16]
Автоматическое определение диаметра аорты	РКТА (n = 1715)	Сверточная НС (U-Net архитектура)	Macruz F. B. C., 2022 [18]
Планирование хирургического лечения и прогнозирование осложнений			
Прогнозирование острой почечной недостаточности и параплегии после протезирования торакоабдоминальной аорты	РКТА (n = 212)	Логистическая регрессия, линейная машина опорных векторов, машина опорных векторов с гауссовым ядром, случайный лес*	Zhou C., 2020 [34]

Планирование TEVAR при коарктации аорты с оценкой гемодинамики исходно и после виртуальной «операции»	3D-ротационная ангиография (n = 6) 3D-ротационная ангиография (n = 6)	Линейная регрессия	Nita C.-I., 2021 [32]
Прогнозирование риска расширения дистального отдела аорты после TEVAR проксимального отдела нисходящей аорты при расслоении аорты типа В	РКТА (n = 503)	Логистическая регрессия, НС, случайный лес, машина опорных векторов	Zhou M., 2021 [36]
Прогнозирование осложнений и выбор момента операции	РКТА (n = 106)	Статистическое моделирование формы, вероятностные атласы, анализ главных компонентов	Catalano C., 2022 [15]
Прогнозирование реоперации после TEVAR при расслоении аорты типа В	РКТА, цифровая субтракционная ангиография, клинические данные (n = 192)	Экстремальный градиентный бустинг, адаптивный бустинг, линейная регрессия, случайный лес, метод К-ближайшего соседа, машина опорных векторов, рекуррентная НС	Dong Y., 2022 [37]
Автоматизированная сегментация аорты, планирование TEVAR, расчет диаметров, ангиуляции, оптимальных посадочных зон	РКТА (n = 465)	Сверточная НС (3D U-Net архитектура)	Saitta S., 2022 [35]

Примечания: 18F-ФДГ — 18F-фтордезоксиглюкоза; ВА — восходящая аорта; ДАК — двустворчатый аортальный клапан; МРТ — магнитно-резонансная томография; НС — нейронная сеть; ПЭТ-КТ — позитронно-эмиссионная компьютерная томография; РКТА — рентгеновская компьютерно-томографическая ангиография; ЭхоКГ — эхокардиография; n — число пациентов; TEVAR — транскатетерное вмешательство на грудной аорте. * — программа прогнозирования находится в открытом доступе в репозитории GitHub.

нии алгоритмов машинного обучения разработаны программы, позволяющие полностью автоматизировать планирование хирургического лечения аневризмы и расслоений грудной аорты, а также прогнозировать развитие периоперационных осложнений [33–37]. Некоторые алгоритмы машинного обучения, разработанные в течение последних 5 лет для улучшения прогнозирования, выявления и лечения патологии грудной аорты, приведены в таблице 1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Алгоритмы машинного обучения и искусственного интеллекта представляют собой весьма мно-

гообещающие инструменты для улучшения прогнозирования, диагностики и лечения заболеваний грудной аорты. Устойчивой современной тенденцией является пациент-ориентированная медицина, когда анамнез, жалобы, клинические проявления, результаты лабораторных и инструментальных исследований должны оцениваться многопрофильной группой экспертов, прежде чем будет сформирован план лечения. Судя по всему, если предоставить системам искусственного интеллекта достаточно большой объем данных, то они смогут превзойти врачей-людей в постановке диагнозов или составлении планов лечения. Задача становится еще более сложной, когда «большие данные», такие как омиксные данные, секвенирование микробиома, электрон-

ные истории болезни, социальные сети, цифровые фото- и видеоизображения, внедряются в процесс лечения пациентов [38, 39]. Интересными подходами являются веб-платформы искусственного интеллекта или приложения искусственного интеллекта для смартфонов, которые отвечают на вопросы пациентов, дают им советы о том, требует ли их состояние внимания медицинского персонала, и контролируют соблюдение режима приема лекарств [40, 41]. Что касается заболеваний грудной аорты, одним из направлений внедрения алгоритмов машинного обучения и искусственного интеллекта станет улучшение процесса сбора данных с включением в углубленный анализ больших групп пациентов, включая такие данные, которые ранее широко не использовались, например, автоматизированный сбор и анализ данных фотоплетизмографии, энтропии, параметров церебральной оксиметрии и вызванных потенциалов спинного мозга. Другим важным направлением, во многом определяющим результат анализа данных, является выбор и усовершенствование применяемого для этого алгоритма. «Простой» алгоритм оперирует ограниченным набором переменных, и от него трудно ожидать высокоточных прогнозов, которые можно экстраполировать на большую когорту пациентов. Реализованным подходом является усложнение алгоритмов, и часто для анализа используются комбинации (пайплайн) нескольких нейронных сетей. Дальнейшим направлением исследований в этой области может стать разработка самообучающихся алгоритмов, которые смогут, сохраняя преимущества одновременной регистрации нескольких десятков или сотен параметров, скорости обработки больших объемов данных, осуществлять одномоментный анализ всех параметров по принципу, наиболее приближенному к функционированию мозга человека, облегчая работу не только рентгенологов, но и врачей других специальностей. Нельзя забывать об ограничениях развития полностью автоматизированных систем, лежащих в этических и правовых плоскостях. Тем не менее, методы распознавания изображений и анализа данных, уже используемые в клинике, являются полезными инструментами, играющими роли консультантов по принятию клинических решений. Большие данные в области медицины, в частности, касающиеся заболеваний грудной аорты, неоднородны и постоянно пополняются, в результате людям трудно вручную эффективно их анализировать. В отличие от людей, искусственный интеллект обладает потенциалом для выполнения этой задачи и находит все большее применение в медицине и, вероятно, что он в итоге создаст эру до и после искусственного интеллекта в здравоохранении.

Конфликт интересов / Conflict of interest

Авторы заявили об отсутствии потенциального конфликта интересов. / The authors declare no conflict of interest.

Информация о соблюдении этических норм при проведении исследования

Исследование было выполнено в соответствии со стандартами надлежащей клинической практики (Good Clinical Practice) и принципами Хельсинкской декларации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Michelena HI, Khanna AD, Mahoney D, et al. Incidence of aortic complications in patients with bicuspid aortic valves. *Jama*. 2011;306(10):1104–12.
2. Meffert P, Tscheuschler A, Beyersdorf F, et al. Characterization of serum matrix metalloproteinase 2/9 levels in patients with ascending aortic aneurysms. *Interactive cardiovascular and thoracic surgery*. 2017;24(1):20–6.
3. Branchetti E, Bavaria JE, Grau JB, et al. Circulating soluble receptor for advanced glycation end product identifies patients with bicuspid aortic valve and associated aortopathies. *Arteriosclerosis, thrombosis, and vascular biology*. 2014;34(10):2349–57.
4. Elefteriades JA. Editorial comment: biomarkers for diagnosis in thoracic aortic disease. *Cardiology clinics*. 28. Netherlands 2010. p. 221–2.
5. Peterss S, Bhandari R, Rizzo JA, et al. The Aortic Root: Natural History After Root-Sparing Ascending Replacement in Nonsyndromic Aneurysmal Patients. *The Annals of thoracic surgery*. 2017;103(3):828–33.
6. Rajput FA, Zeltser R. Aortic valve replacement. *StatPearls*. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing Copyright © 2021, StatPearls Publishing LLC.; 2021.
7. Sirajuddin S, Wang CK, Al-Abri Q, et al. Early results of a modified biological valved conduit for the Bentall procedure. *Journal of cardiac surgery*. 2019;34(6):412–8.
8. Amisha, Malik P, Pathania M, Rathaur VK. Overview of artificial intelligence in medicine. *Journal of family medicine and primary care*. 2019;8(7):2328–31.
9. Chandrashekar A, Handa A, Shivakumar N, et al. A deep learning pipeline to automate high-resolution arterial segmentation with or without intravenous contrast. *Annals of surgery*. 2022;276(6):e1017-lpagee27.
10. Bruse JL, Zuluaga MA, Khushnood A, et al. Detecting clinically meaningful shape clusters in medical image data: metrics analysis for hierarchical clustering applied to healthy and pathological aortic arches. *IEEE Trans Biomed Eng*. 2017;64(10):2373–83.

11. Alhafez BA, Truong VTT, Ocazonez D, Sohrabi S, Sandhu H, Estrera A, et al. Aortic arch tortuosity, a novel biomarker for thoracic aortic disease, is increased in adults with bicuspid aortic valve. *International journal of cardiology*. 2019;284:84–9.
12. Condemì F, Campisi S, Viallon M, Relationship between ascending thoracic aortic aneurysms hemodynamics and biomechanical properties. *IEEE Trans Biomed Eng*. 2019.
13. Della Corte A, Bancone C, Buonocore M, et al. Pattern of ascending aortic dimensions predicts the growth rate of the aorta in patients with bicuspid aortic valve. *JACC Cardiovascular imaging*. 2013;6(12):1301–10.
14. Krüger T, Sandoval Boburg R, Lescan M, et al. Aortic elongation in aortic aneurysm and dissection: the Tübingen Aortic Pathoanatomy (TAIPAN) project. *European journal of cardio-thoracic surgery : official journal of the European Association for Cardio-thoracic Surgery*. 2018;54(1):26–33.
15. Catalano C, Agnese V, Gentile G, et al. Atlas-based evaluation of hemodynamic in ascending thoracic aortic aneurysms. *Applied Sciences*. 2022;12(1):394.
16. Huang LT, Tsai YS, Liou CF, et al. Automated Stanford classification of aortic dissection using a 2-step hierarchical neural network at computed tomography angiography. *European radiology*. 2022;32(4):2277–85.
17. Adam C, Fabre D, Mougin J, et al. Pre-surgical and post-surgical aortic aneurysm maximum diameter measurement: full automation by artificial intelligence. *European journal of vascular and endovascular surgery : the official journal of the European Society for Vascular Surgery*. 2021;62(6):869–77.
18. Macruz FBC, Lu C, Strout J, et al. Quantification of the thoracic aorta and detection of aneurysm at CT: development and validation of a fully automatic methodology. *Radiology Artificial intelligence*. 2022;4(2):e210076.
19. Frasconi P, Baracchi D, Giusti B, et al. Two-dimensional aortic size normalcy: a novelty detection approach. *Diagnostics (Basel, Switzerland)*. 2021;11(2).
20. Duff L, Scarsbrook AF, Mackie SL, et al. A methodological framework for AI-assisted diagnosis of active aortitis using radiomic analysis of FDG PET-CT images: Initial analysis. *J Nucl Cardiol*. 2022;29(6):3315–31.
21. Bollache E, Guzzardi DG, Sattari S, et al. Aortic valve-mediated wall shear stress is heterogeneous and predicts regional aortic elastic fiber thinning in bicuspid aortic valve-associated aortopathy. *The Journal of thoracic and cardiovascular surgery*. 2018;156(6):2112–20.e2.
22. Franco P, Sotelo J, Guala A, et al. Identification of hemodynamic biomarkers for bicuspid aortic valve induced aortic dilation using machine learning. *Comput Biol Med*. 2022;141:105147.
23. Masri A, Kalahasti V, Svensson LG, et al. Aortic cross-sectional area/height ratio and outcomes in patients with bicuspid aortic valve and a dilated ascending aorta. *Circulation Cardiovascular imaging*. 2017;10(6):e006249.
24. Wojnarski CM, Roselli EE, Idrees JJ, et al. Machine-learning phenotypic classification of bicuspid aortopathy. *The Journal of thoracic and cardiovascular surgery*. 2018;155(2):461–9.e4.
25. Wang D, Zhang R, Zhu J, et al. Neural network fusion: a novel CT-MR Aortic Aneurysm image segmentation method. *Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering*. 2018;10574.
26. Chen D, Zhang X, Mei Y, et al. Multi-stage learning for segmentation of aortic dissections using a prior aortic anatomy simplification. *Medical image analysis*. 2021;69:101931.
27. Cao L, Shi R, Ge Y, et al. Fully automatic segmentation of type B aortic dissection from CTA images enabled by deep learning. *European journal of radiology*. 2019;121:108713.
28. Liang L, Liu M, Martin C, et al. A machine learning approach to investigate the relationship between shape features and numerically predicted risk of ascending aortic aneurysm. *Biomechanics and modeling in mechanobiology*. 2017;16(5):1519–33.
29. Fantazzini A, Esposito M, Finotello A, et al. 3D automatic segmentation of aortic computed tomography angiography combining multi-view 2D convolutional neural networks. *Cardiovascular engineering and technology*. 2020;11(5):576–86.
30. Liu M, Liang L, Ismail Y, et al. Computation of a probabilistic and anisotropic failure metric on the aortic wall using a machine learning-based surrogate model. *Comput Biol Med*. 2021;137:104794.
31. Chen W, Huang H, Huang J, et al. Deep learning-based medical image segmentation of the aorta using XR-MSF-U-Net. *Computer methods and programs in biomedicine*. 2022;225:107073.
32. Nita CI, Puiu A, Bunesco D, et al. Personalized pre- and post-operative hemodynamic assessment of aortic coarctation from 3D rotational angiography. *Cardiovascular engineering and technology*. 2022;13(1):14–40.
33. Talebi S, Madani MH, Madani A, et al. Machine learning for endoleak detection after endovascular aortic repair. *Scientific reports*. 2020;10(1):18343.
34. Zhou C, Wang R, Jiang W, et al. Machine learning for the prediction of acute kidney injury and paraplegia after thoracoabdominal aortic aneurysm repair. *Journal of cardiac surgery*. 2020;35(1):89–99.

35. Saitta S, Sturla F, Caimi A, et al. A deep learning-based and fully automated pipeline for thoracic aorta geometric analysis and planning for endovascular repair from computed tomography. *Journal of digital imaging*. 2022;35(2):226–39.

36. Zhou M, Shi Z, Li X, et al. Prediction of distal aortic enlargement after proximal repair of aortic dissection using machine learning. *Annals of vascular surgery*. 2021;75:332–40.

37. Dong Y, Que L, Jia Q, et al. Predicting reintervention after thoracic endovascular aortic repair of Stanford type B aortic dissection using machine learning. *European radiology*. 2022;32(1):355–67.

38. Larentzakis A, Lygeros N. Artificial intelligence (AI) in medicine as a strategic valuable tool. *The Pan African medical journal*. 2021;38:184.

39. Semenova D, Zabirnyk A, Lobov A, et al. Multi-omics of in vitro aortic valve calcification. *Frontiers in cardiovascular medicine*. 2022;9:1043165.

40. Aguiar M, Trujillo M, Chaves D, et al. mHealth apps using behavior change techniques to self-report data: systematic review. *JMIR mHealth and uHealth*. 2022;10(9):e33247.

41. Labovitz DL, Shafner L, Reyes Gil M, et al. Using artificial intelligence to reduce the risk of nonadherence in patients on anticoagulation therapy. *Stroke*. 2017;48(5):1416–9.

Информация об авторах:

Успенский Владимир Евгеньевич, д.м.н., заведующий НИЛ заболеваний аорты и аортального клапана Института сердца и сосудов ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России;

Сапранков Валерий Леонидович, очный аспирант кафедры сердечно-сосудистой хирургии ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России;

Мазин Виктор Игоревич, очный аспирант кафедры сердечно-сосудистой хирургии ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России;

Филиппов Алексей Александрович, к.м.н., младший научный сотрудник НИЛ заболеваний аорты и аортального клапана ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России;

Боярская Надежда Владимировна, младший научный сотрудник НИГ молекулярных механизмов кальцификации НЦМУ «Центр персонализированной медицины»;

Малашичева Анна Борисовна, д.б.н., заведующий НИЛ кардиологии и генетики ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России;

Моисеева Ольга Михайловна, д.м.н., директор Института сердца и сосудов ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России.

Author information:

Uspenskiy Vladimir E., MD, PhD, Head of the Research Laboratory for Aorta and Aortic Valve Diseases, Institute of Heart and Vascular Diseases, Almazov National Medical Research Centre;

Saprankov Valery L., full-time postgraduate student of the Department of Cardiovascular Surgery, Almazov National Medical Research Centre;

Mazin Victor I., full-time postgraduate student of the Department of Cardiovascular Surgery at the Almazov National Medical Research Centre;

Filippov Alexey A., MD, Candidate of Medical Sciences, junior researcher, Research Laboratory for Aorta and Aortic Valve Diseases, Institute of Heart and Vascular Diseases, Almazov National Medical Research Centre;

Boyarskaya Nadezhda V., junior researcher, Research Group for Molecular Mechanisms of Calcification, World-Class Research Centre for Personalized Medicine;

Malashicheva Anna B., MD, PhD, Head of Research Laboratory of Cardiology and Genetics, Almazov National Medical Research Centre;

Moiseeva Olga M., MD, PhD, Director of the Institute of Heart and Vascular Surgery, Almazov National Medical Research Centre.