

A.K. Сморчкова, А.В. Петряйкин, Ю.А. Васильев

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ОЦЕНКЕ МЫШЕЧНОЙ ТКАНИ ПО КОМПЬЮТЕРНО-ТОМОГРАФИЧЕСКИМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ: ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий
Департамента здравоохранения города Москвы, Москва

Контактное лицо: Анастасия Кирилловна Сморчкова, e-mail: SmorchkovaAK@zdrav.mos.ru
СОДЕРЖАНИЕ

Введение: В настоящее время всё больше внимания уделяется синдромам и заболеваниям, при которых изменяется качественный и количественный состав тела человека. Саркопения – заболевание, характеризующееся генерализованной потерей мышечной массы и силы, поражающее как трудоспособное, так и пожилое население, с глобальной распространённостью в общей популяции до 10 % по данным литературы. Согласно критериям Европейской рабочей группы по саркопении у пожилых людей от 2019 г., «золотым стандартом» медицинской визуализации для оценки снижения мышечной массы являются компьютерная томография (КТ) и магнитно-резонансная томография (МРТ). Ввиду всё более широкого использования технологий искусственного интеллекта (ИИ) открываются перспективы анализа большого объёма медицинских данных, прежде всего КТ-изображений.

Цель: Ознакомление широкой аудитории с актуальными работами по лучевой диагностике значимых изменений скелетной мышечной ткани по КТ-изображениям с использованием технологий ИИ, включая анализ имеющихся вариантов их клинического и научного применения.

Методология поиска и отбора: Произведен поиск публикаций по расширенному поисковому запросу в библиографических базах PubMed и eLibrary.ru.

Результаты: Проанализировано 46 отобранных оригинальных статей, опубликованных в период с 2019 по 2024 гг. Рассмотрены варианты клинического и научного применения алгоритмов ИИ. Основная цель клинического применения – оценка прогностической ценности морфометрических показателей саркопении для широкого ряда заболеваний – онкологических (большая часть работ) и хронических, а также для состояний после хирургических вмешательств. Отмечено получение дополнительных морфометрических показателей не только мышечной, но и жировой ткани в тех работах, где это проводилось и имело клиническую значимость. Выделена основная проблема, существующая в настоящее время – отсутствие четкого места в клинико-диагностической парадигме. Основной вариант научного применения – обработка большого количества данных для популяционных исследований. Приведены детали методологии КТ-оценки состава тела, включая наиболее часто используемые пороговые показатели скелетно-мышечного индекса для КТ-диагностики саркопении, а также были кратко описаны технические аспекты использованных алгоритмов ИИ. В заключение был отмечен высокий интерес исследователей к данной теме, обозначены перспективы для дальнейших исследований в данной области и применения на практике их результатов.

Ключевые слова: саркопения, компьютерная томография, искусственный интеллект, глубокое обучение, морфометрия

Для цитирования: Сморчкова А.К., Петряйкин А.В., Васильев Ю.А. Возможности применения искусственного интеллекта в оценке мышечной ткани по компьютерно-томографическим изображениям: обзор литературы // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2025. Т. 70. № 1. С. 81–92. DOI:10.33266/1024-6177-2025-70-1-81-92

A.K. Smorchkova, A.V. Petraikin, Yu.A. Vasilev

Potential Applications of Artificial Intelligence in Muscle Tissue Assessment by Computed Tomography Images: a Literature Review

Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies, Moscow, Russia

Contact person: A.K. Smorchkova, e-mail: SmorchkovaAK@zdrav.mos.ru

CONTENTS

Background: Syndromes and diseases in which the qualitative and quantitative composition of the human body change are receiving increasing attention. Sarcopenia is a disease characterized by generalized loss of muscle mass and strength, affecting both able-bodied and elderly populations, with a global prevalence in the general population of up to 10% according to the literature. According to the 2019 European Working Group on Sarcopenia in the Elder People consensus, the gold standard of medical imaging for the assessment of muscle mass loss is computed tomography (CT) and magnetic resonance imaging (MRI). With the increasing use of artificial intelligence (AI) technologies, there is an opportunity to analyze large amounts of medical data, including CT images.

Purpose: To acquaint the general audience with the current work on the medical imaging of significant changes in skeletal muscle tissue from CT images using AI technologies, including highlighting the available options for their clinical and scientific application.

Search and selection methodology: Publications have been searched by advanced search query in bibliographic databases PubMed and eLibrary.ru.

Results: 46 selected original articles published between 2019 and 2024 have been analyzed.

The variants of clinical and scientific application of AI algorithms are reviewed. The main purpose of clinical application is to assess the prognostic value of morphometric indices of sarcopenia for a wide range of diseases – oncological (most of the works) and chronic, as well as for conditions after surgical interventions. The acquisition of additional morphometric indices of not only muscle but also adipose tissue were noted in works where it had been carried out and had clinical significance. The main problem existing at present time is highlighted,

which is the lack of a clear place in the clinical diagnostic paradigm. The main option for scientific application is the processing of large amounts of data for population studies. Details of the methodology of CT body composition assessment, including the most commonly used skeletal muscle index thresholds for CT diagnosis of sarcopenia, are given, and the technical aspects of the AI algorithms used were summarised. In conclusion, the high interest of researchers in this topic was noted, and prospects for further research in this area and application in practice were outlined.

Keywords: sarcopenia, computed tomography, artificial intelligence, deep learning, morphometry

For citation: Smorchkova AK, Petraikin AV, Vasilev YuA. Potential Applications of Artificial Intelligence in Muscle Tissue Assessment by Computed Tomography Images: a Literature Review. Medical Radiology and Radiation Safety. 2025;70(1):81–92. (In Russian). DOI:10.33266/1024-6177-2025-70-1-81-92

Введение

В настоящее время всё большее внимания уделяется синдромам и заболеваниям, в результате которых изменяется качественный и количественный состав тела человека. К таким патологическим состояниям можно отнести ожирение, саркопению, остеопороз, кахексию.

Саркопения – заболевание, характеризующееся генерализованной потерей мышечной силы и массы, которое может поражать как трудоспособное, так и пожилое население. С 2016 г. данное состояние имеет собственный код в МКБ-10 (M62.84). В Российской Федерации саркопения чаще рассматривается в качестве компонента старческой астении, диагностируется амбулаторно в рамках скрининга при первичном контакте пациента с системой здравоохранения или в рамках комплексной гериатрической оценки в соответствии с клиническими рекомендациями, подготовленными Российской ассоциацией геронтологов и гериатров [1].

Несмотря на то, что по последним критериям Европейской рабочей группы по саркопении у пожилых людей (European Working Group on Sarcopenia in Older People – EWGSOP) от 2019 г. первичным определяющим параметром наличия саркопении является потеря мышечной силы, сохраняется необходимость подтверждения и дополнения его фактом снижения также и мышечной массы [2]. Данный факт рекомендуется устанавливать с помощью методов медицинской визуализации, в частности – двухэнергетической рентгеновской абсорбциометрией (ДРА), компьютерной или магнитно-резонансной томографией (КТ и МРТ). КТ и МРТ признаются EWGSOP методами «золотого стандарта» для подтверждения факта снижения мышечной массы. В отличие от ДРА, преимуществом КТ и МРТ является возможность непосредственной визуализации структуры мышечной и жировой тканей, в частности – оценка межмышечного и внутримышечного жира. Дополнительным параметром, представляющим интерес для оценки, является рентгеновская плотность скелетной мышечной ткани (РПСМТ), определяемая по КТ-изображениям и измеряющаяся в единицах Хаунсфилда (HU) [3].

С развитием технологий искусственного интеллекта (ИИ), а именно глубокого обучения (Deep Learning – DL), открываются новые возможности для быстрой обработки и анализа большого количества данных, в том числе и медицинских диагностических изображений. Данные технологии уже успешно применяются для задач компьютерного зрения, сегментации органов и тканей, и таким образом используются и в диагностике саркопении [4]. При выборе между КТ- и МРТ-изображениями для анализа с помощью ИИ, КТ-изображения используются чаще за счет более простой предварительной подготовки данных (полуавтоматическая разметка тканей по пороговым значениям), а также более частого выполнения КТ-исследований органов брюшной полости по сравнению с МРТ, что обеспечивает больший объем доступных данных [5]. Учитывая скорость обработки, наличие

полностью автоматизированных решений и отсутствие дополнительных временных затрат для врача-рентгенолога, использование готовых программ для извлечения информации о мышечной ткани из КТ-изображений достаточно уже сейчас.

Целью данного литературного обзора является ознакомление широкой аудитории с актуальными работами по лучевой диагностике значимых изменений скелетно-мышечной ткани по КТ-изображениям (с основным фокусом на саркопении) с использованием технологий DL, включая рассмотрение имеющихся вариантов их клинического и научного применения.

Методология поиска и отбора

Был проведен поиск по электронной библиографической базе научных работ PubMed, с использованием поискового запроса: «((deep learning[Title/Abstract]) OR (machine learning[Title/Abstract]) OR (artificial intelligence[Title/Abstract])) AND ((sarcopenia[Title/Abstract]) AND ((computed tomography[Title/Abstract]) OR (computer tomography[Title/Abstract]) OR (CT[Title/Abstract])))». Дополнительно проведен поиск по электронной библиографической базе научных работ eLibrary.ru, с использованием сочетаний следующих ключевых слов: «искусственный интеллект» или «машинальное обучение», «саркопения» и «компьютерная томография». Рассматривались работы, опубликованные в период с 2017 по 2024 гг. Анализ публикаций производился одним автором. Оценка соответствия критериям включения выполнялась поэтапно: первоначально рассматривалось название работы, затем – содержание аннотации, и на финальном этапе – её полный текст.

Были включены только оригинальные исследования, в которых принимались во внимание исследуемые когорты как с первичной, так и вторичной саркопенией (первичная – как гериатрический синдром, вторичная – как синдром, сопутствующий основному заболеванию), где для количественной оценки мышечной ткани использовалось программное обеспечение (ПО) на основе технологий ИИ (машинальное обучение, DL). Рассматривались работы, в которых проводилось определение любых параметров, характеризующих абсолютную и/или нормализованную (скелетно-мышечный индекс – СМИ) площадь скелетной мышечной ткани. Отмечался также факт оценки дополнительных морфометрических данных, оценивающих как мышечную ткань (объем скелетной мышечной ткани, РПСМТ), так и жировую ткань (площадь/объем подкожной жировой ткани, площадь/объем висцеральной жировой ткани и т.п.). Также рассматривалась информация о влиянии искомых морфометрических данных на клинические исходы основного заболевания когорты пациентов, где это было применимо.

В обзор не были включены: 1) работы, целью которых являлось только описание процесса разработки ПО, без оценки влияния оцениваемых морфометрических параметров на клинические исходы или дальнейшего

использования для достижения основной цели исследования; 2) работы, в которых отсутствовала оценка КТ-изображений; 3) работы, в которых технологии ИИ не применялись; 4) работы, конечной целью которых являлся радиометрический анализ.

Результаты

На момент написания этого обзора (июнь 2024 г.) по вышеобозначенному поисковому запросу в базе PubMed было обнаружено 114 публикаций, при первичном просмотре которых были исключены 14, не являвшиеся оригинальными исследованиями. В дальнейшем, при ознакомлении с аннотацией и полным текстом работ было исключено еще 54 публикации, содержание и/или тематика которых не соответствовала заданным критериям включения для данного обзора. В базе eLibrary.ru по сочетанию вышеобозначенных ключевых слов было обнаружено 2 публикации, исключенные при первичном просмотре (1 литературный обзор и 1 оригинальное исследование, попадающее в критерии невключения). Для итогового анализа было отобрано 46 работ [6–51], опубликованных в период с 2019 по 2024 гг. Пик публикационной активности приходится на 2024-й г.

Был оценен ряд общих аспектов работ: основное заболевание исследуемой когорты пациентов, конкретная цель применения ИИ (цель проведения оценки скелетной мышечной ткани), критерий определения наличия саркопении по КТ-изображениям (если это проводилось), пороговое значение для постановки диагноза “саркопения” в исследуемой когорте (если диагноз устанавливался), анатомический ориентир для анализа (уровень для выбора поперечного среза из серии, если применимо), оцениваемые морфометрические параметры. Все исследования были проведены ретроспективно. Краткая характеристика включенных в обзор публикаций по данным аспектам представлена в табл. 1.

Для лучшего понимания контекста применения ПО на основе ИИ для оценки состава тела, авторы считают целесообразным перед представлением клинических сценариев привести ниже краткую дополнительную информацию по основным принципам разработки такого ПО, а также – по методике количественной оценки скелетной-мышечной ткани по КТ-изображениям.

Анатомические ориентиры для выбора КТ-изображения для анализа

В КТ-диагностике основной величиной, используемой для количественной оценки скелетной мышечной ткани, является площадь её поперечного сечения (площадь скелетной мышечной ткани – ПСМ), измеряемая в cm^2 . Данная величина затем, в большинстве случаев (что отражено и в выборке публикаций – 37 из 46, 80,4 %) нормализуется по росту или массе тела пациента. Этот производный параметр определяется как скелетно-мышечный индекс (L3 СМИ). Общепринятая формула расчета L3 СМИ следующая:

$$\text{L3 СМИ} = \frac{S}{h^2},$$

где S – площадь поперечного сечения скелетной мышечной ткани в cm^2 , h – рост в м.

Наиболее часто используемым ориентиром для выбора КТ-среза для последующего анализа является уровень тела L3 позвонка – его середины или нижней замыкательной пластины. Соотношение мышечной массы к жировой ткани и внутривершинным органам на уровне L3 хорошо коррелирует с соотношением для всего тела

по данным литературы, может быть использовано для оценки общей массы мышечной ткани у пациентов [52]. Действительно, данный ориентир используется в подавляющем большинстве публикаций (32 из 46). Тем не менее, необходимо отметить и публикации, где уровень анализа был иным по различным причинам: уровень позвонка Th12 [8], уровень позвонка L1 [11], уровень межпозвонкового диска сегмента L3–L4 [22], уровень верхней брыжеечной артерии [37], а также совокупность срезов на уровне тел Th5, Th8, Th10, L3 [40] и L1–L4 [50]. Основная причина выбора уровня грудных позвонков объясняется ограничением методики использования общепризнанного уровня L3, а именно – более редкая встречаемость данного уровня в более часто проводимом рутинном КТ-исследовании, которым является КТ органов грудной клетки.

Пороговые значения для постановки диагноза “саркопения”

Согласно рекомендациям EWGSOP, постановка диагноза “саркопения” должна производиться по трем критериям, перечисленным в порядке от наиболее к наименее важному: 1) факт снижения мышечной силы (определенный при динамометрии); 2) факт снижения мышечной массы (определенный при дополнительных инструментальных исследованиях, желательно – на основе визуализации); 3) факт снижения физической работоспособности (согласно клиническим тестам) [53]. При условии безусловного следования данным рекомендациям, клинический диагноз “саркопения” не может быть установлен без проведения динамометрии, т.е. только по данным медицинской визуализации. Тем не менее, медицинская визуализация необходима для подтверждения факта снижения скелетной мышечной массы, что часто сопровождает и снижение мышечной силы. Таким образом, исследователи используют различные пороговые значения скелетно-мышечного индекса для определения групп пациентов с саркопенией и здоровых пациентов по результатам КТ-визуализации.

Ограничением для использования КТ в качестве средства инструментальной диагностики является отсутствие общепризнанных рабочими группами по саркопении (как европейской, так и азиатской) пороговых значений для данного метода. В связи с этим для диагностики саркопении по СМИ, определенному для уровня L3, авторами вошедших в обзор публикаций использовались различные критерии. Сводная таблица использованных пороговых значений для уровня позвонка L3, а также их источник приведены в табл. 2.

Наибольшая часть представленных пороговых значений L3 СМИ использовалась без принятия во внимание индекса массы тела (ИМТ) пациента, и таким образом не требовала получения информации о его массе тела. Тем не менее, присутствовали и работы, где ИМТ имел значение для определения принадлежности пациентов в группе имеющих саркопению [20, 27].

Наиболее часто используемыми [9, 17, 18, 21, 23, 29, 32, 38, 49] показателями являлись $55 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ для мужчин и $39 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ для женщин, предложенными международным консенсусом по кахексии [54]. Данные показатели применялись как для европейской, американской, так и для азиатской популяций. Вторыми по частоте использования показателями [10, 25, 26, 30, 43, 47] являлись $52,4 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ для мужчин и $38,5 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ для женщин [55]. В обоих случаях эти значения были определены для когорт пациентов с онкологическими заболеваниями (солидные образования дыхательных путей и желудочно-кишечного тракта), поэтому их применение не всегда

Таблица 1

Краткая характеристика включенных в обзор публикаций
A brief description of the publications included in the review

Авторы	Год	Основная патология	Цель применения	Критерий определения саркопении (КТ-визуализация)	Изучаемые морфометрические параметры
1	2	3	4	5	6
Sakamoto K et al [51]	2024	Рак полости рта	Оценка прогностической ценности	—	Объём жевательных мышц
Cho SW et al [50]	2024	Метаболический синдром, остеопороз, саркопения	Разработка прогностической модели для определения метаболического синдрома, остеопороза и саркопении; оценка прогностической ценности	—	ПСМ, РПСМТ, ПЖТ (висцеральная и подкожная), РПЖТ (висцеральная и подкожная), плотность кости
Hanna PE et al [49]	2024	Пациенты с известным онкологическим заболеванием (без уточнения первично пораженного органа)	Оценка корреляции между параметрами состава тела и расхождением СКФ по креатинину и СКФ по цистатину С	L3 СМИ	СМИ, ИВЖ, ИПЖ
Pekař M et al [48]	2024	Состояние после транскатетерной имплантации аортального клапана (TAVI)	Оценка прогностической ценности	L3 СМИ	СМИ, ИВЖ, ИПЖ, РПСМТ, РПЖТ (подкожная и висцеральная)
Suthakaran R et al [47]	2024	Состояние после реконструктивно-восстановительного вмешательства после операции	Оценка прогностической ценности	L3 СМИ	ПСМ, СМИ, РПСМТ, ПЖТ (висцеральная, подкожная), РПЖТ (висцеральная и подкожная)
Weston AD et al [46]	2024	Нет (когорта Рочестерского Эпидемиологического Проекта (REP))	Получение референсных значений	L3 СМИ	ПСМ, СМИ, РПСМТ, ИВЖ, ИПЖ площадь костной ткани позвонков (включая индексацию по квадрату роста), плотность позвонков
Lee MW et al [45]	2024	Оценка прогностической ценности, динамики изменения параметров состава тела	Оценка прогностической ценности, динамики изменения параметров состава тела	L3 СМИ	ПСМ, СМИ, РПСМТ, ИВЖ, ИПЖ
Keyl J et al [44]	2024	Протоковая аденокарцинома поджелудочной железы	Оценка прогностической ценности	—	ОМ (стенка живота), объем костной ткани, ОЖ (внутри- и межмышечная), РПСМТ
Just IA et al [43]	2024	Состояние после установки левожелудочковой системы вспомогательного кровообращения, на фоне сердечной недостаточности	Оценка прогностической ценности	L3 СМИ	ПСМ (общая, <i>trapezius</i> , общая мышечная ткань стенки живота), СМИ, РПСМТ, ПЖТ (подкожная, висцеральная), отношение подкожной и висцеральной ПЖТ
Blankemeier L et al [42]	2024	Нет (две когорты пациентов – с наличием и с отсутствием серьёзного заболевания)	Получение референсных значений	—	ПСМ
Nowak S et al [37]	2024	Прогрессирующая аденокарцинома поджелудочной железы	Оценка прогностической ценности	—	СМИ, РПСМТ, доля адипозной мышечной ткани, доля мышмышечной жировой ткани
Tonnesen PE et al [40]	2024	Сердечно-сосудистые заболевания (когорта Фрамингемского исследования сердца)	Получение референсных значений	—	СМИ, ПСМ, РПСМТ, скелетно-мышечная шкала (<i>Skeletal muscle gauge</i> – СМИ*РПСМТ)
Souza ACDAH et al [41]	2024	Микроваскулярная стенокардия	Оценка прогностической ценности	L3 СМИ	СМИ, ПСМ, ПЖТ (подкожная, висцеральная)
Nandakumar B et al [29]	2023	Множественная миелома	Оценка прогностической ценности	L3 СМИ	СМИ, ПСМ
Keyl J et al [31]	2023	Прогрессирующий колоректальный рак с метастатическим поражением печени	Оценка прогностической ценности	—	ОМ, мышечно-костное отношение
Lee JH et al [32]	2023	Нет (когорта пациентов, прошедших чек-ап)	Оценка прогностической ценности	L3 СМИ	СМИ, РПЖТ (висцеральный), ИВЖ
Borrelli A et al [33]	2023	Прогрессирующая уротелиальная опухоль верхних мочевыводящих путей, мочевого пузыря	Оценка прогностической ценности	L3 СМИ	СМИ
He M et al [34]	2023	Прогрессирующий рак желудка	Оценка прогностической ценности	L3 СМИ	СМИ, ПСМ, РПСМТ, ПЖТ (подкожная, висцеральная)
Park SJ et al [35]	2023	Состояние после трансплантации печени	Оценка прогностической ценности	СМИ (полученный по ОМ на уровне талии)	СМИ, ПСМ

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6
Mangana Del Rio T et al [36]	2023	Острая печеночная недостаточность, развившаяся на фоне хронической (ОПХН)	Оценка прогностической ценности	L3 СМИ	СМИ, ПСМ, РПСМТ, ПЖТ (межмышечная, подкожная, висцеральная), РПЖТ (подкожная, висцеральная), ИВЖ, ИПЖ
Choi SJ et al [38]	2023	Боковой амиотрофический склероз	Оценка прогностической ценности	L3 СМИ	СМИ, ПСМ, ОЖ (общий, подкожная, висцеральная), ИВЖ, ИПЖ, РПЖТ (подкожная)
Kim M et al [39]	2023	Колоректальный рак	Оценка прогностической ценности	СМИ (полученный по ОМ на уровне талии)	ОМ, РПСМТ, СМИ
Laur O et al [20]	2022	Синдром старческой хрупкости (саркопения, остеопороз, висцеральное ожирение)	Оценка распространенности, оценка связи с диагностирование старческой хрупкости	L3 СМИ	СМИ, ПЖТ (подкожная, висцеральная), минеральная плотность кости
Massaad E et al [23]	2022	Нет (наличие метастатического поражения позвоночника)	Оценка прогностической ценности	L3 СМИ	СМИ, РПСМТ, ПЖТ (подкожная, висцеральная)
Somasundaram E et al [24]	2022	Нет (педиатрическая когорта)	Получение референсных значений	–	СМИ, ПСМ
Beetz NL et al [25]	2022	Состояние после трансплантации почки	Оценка прогностической ценности	L3 СМИ	СМИ (общий на уровне L3, по поясничным мышцам), ПСМ (общая на уровне L3, поясничных мышц), ПЖТ (подкожная, висцеральная)
Beetz NL et al [26]	2022	Аденокарцинома поджелудочной железы	Оценка прогностической ценности	L3 СМИ	СМИ, ПЖТ (подкожная, висцеральная)
Kim DW et al [27]	2022	Резектабельная протоковая аденокарцинома поджелудочной железы	Оценка прогностической ценности	L3 СМИ	СМИ, РПСМТ
Hosch R et al [28]	2022	SARS-CoV-2	Оценка прогностической ценности	–	ОМ, ОЖ (подкожный, висцеральный, внутри- и межмышечный, эпикардиальный, перикардиальный)
Lee JY et al [30]	2022	Болезнь Крона	Оценка прогностической ценности	L3 СМИ	СМИ, ПЖТ (подкожная, висцеральная)
Lee SA et al [14]	2022	Состояние после традиционной хирургической замены аортального клапана	Оценка прогностической ценности	L3 СМИ	СМИ, ПСМ
Lee J et al [11]	2021	Прогрессирующий плоскоклеточный рак лёгкого	Оценка прогностической ценности, динамики изменения параметров состава тела	L1 СМИ	СМИ (на уровне L1), ПСМ
Yoon JK et al [12]	2021	Нет (когорта здоровых доноров печени)	Получение референсных значений	L3 СМИ	СМИ, ПСМ
Hsu TH et al [13]	2021	Рак поджелудочной железы	Оценка прогностической ценности	L3 СМИ	СМИ, ПЖТ (висцеральная)
Lenchik L et al [8]	2021	Нет (когорта Национального скрининга рака лёгкого (NLST))	Оценка прогностической ценности	–	ПСМ, РПСМТ
Kong HH et al [15]	2021	Протоковая аденокарцинома поджелудочной железы	Оценка долгосрочной динамики изменения параметров состава тела	L3 СМИ	СМИ, ИПЖ, ИВЖ
Kim J et al [16]	2021	Рак желудка	Оценка прогностической ценности	L3 СМИ	СМИ, ПСМ, ПЖТ (подкожная, висцеральная), ИВЖ, ИПЖ

Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5	6
Jullien M et al [17]	2021	Диффузная крупноклеточная В-клеточная лимфома	Оценка прогностической ценности	L3 СМИ	СМИ, РПСМТ
Han Q et al [18]	2021	Плоскоклеточный и железисто-плоскоклеточный рак шейки матки	Оценка прогностической ценности	L3 СМИ, ОМ	СМИ, ОМ, ОЖ (общий)
Ying T et al [19]	2021	Рак мочевого пузыря	Оценка прогностической ценности	—	ОМ
Kim SI et al [21]	2021	Рак эндометрия	Оценка прогностической ценности	L3 СМИ	СМИ (общий на уровне L3 и объемный), ПСМ, ОМ
Faron A et al [22]	2021	Меланома	Оценка прогностической ценности	L3 СМИ	СМИ, ИПЖ, ИВЖ
Magudia K et al [9]	2020	Нет (общая популяция, без онкологических и тяжелых сердечно-сосудистых заболеваний)	Получение референсных значений	L3 СМИ	СМИ, ПСМ, ПЖТ
Fischer S et al [10]	2020	Рак предстательной железы	Оценка эффекта препарата (энзалутамид и абиратерон) на потерю мышечной и подкожной жировой тканей	L3 СМИ	СМИ, ПСМ, ПЖТ
Graffy PM et al [6]	2019	Нет (асимптоматичные пациенты)	Оценка возможности проведения оппортунистического скрининга в динамике, получение референсных значений	L3 СМИ	СМИ (по срезу на уровне L3, средний по общему объему мышечной ткани), ПСМ, ОМ, РПСМТ
Gillen J et al [7]	2019	Рак эндометрия	Оценка прогностической ценности	Медиана общей площади поясничных мышц на уровне L3	ПСМ (поясничные мышцы), ПЖТ (подкожная, висцеральная), РПСМТ, РПЖТ (подкожная, висцеральная)

Примечание: СМИ – скелетно-мышечный индекс, ПСМ – площадь скелетной мышечной ткани, ПЖТ – площадь жировой ткани, ОМ – объем мышечной ткани, ОЖ – объем жировой ткани, ИПЖ – индекс подкожной жировой ткани, ИВЖ – индекс висцеральной жировой ткани, РПСМТ – рентгеновская плотность скелетной мышечной ткани, РПЖТ – рентгеновская плотность жировой ткани, СКФ – скорость клубочковой фильтрации

может быть целесообразным в отсутствие сходной патологии. Также в ряде работ авторы определяли собственные пороговые значения для категоризации пациентов, исходя из средних антропометрических данных исследуемой когорты [12, 14, 22, 27, 45, 48].

Общепринятые нормы для объема мышечной ткани в настоящее время также отсутствуют, в т.ч. из-за меньшей распространенности соответствующих ПО-решений и более редкого использования в качестве объекта изучения (8 работ из 46) [6, 18, 19, 28, 31, 39, 44, 51]. Для определения пороговых значений для установления факта снижения объема скелетной-мышечной ткани необходимы дальнейшие популяционные исследования.

Программное обеспечение для диагностики каркозии и технологии его разработки

Имеющиеся ПО-решения для оценки скелетной мышечной ткани используют два подхода – ручной выбор необходимого среза для анализа с автоматической сегментацией, требующий вмешательства врача-рентгенолога, и автоматический выбор необходимого среза, не требующий вмешательства врача-рентгенолога.

Основным предоставляемым функционалом в рамках как первого, так и второго подхода является автоматическая сегментация. Почти во всех работах для разработки алгоритмов-сегментаторов на основе технологий ИИ использовалась архитектура U-Net и её модификации, представляющая собой вариант сверточной ней-

ронной сети (Convolutional Neural Network – CNN) [61]. Существуют 2D (более часто) и 3D (более редко) вариации U-Net, позволяющие получать и сегментировать не только маску оцениваемой ткани по площади, но и маску по объему. ПО на основе U-Net показывает хорошие метрики точности: часто коэффициент подобия Сёренсена–Дайса превышает 0,9 [9, 17, 34]. Отдельно стоит упомянуть веб-решение RECOMIA, использовавшееся в одной из работ [19], где для сегментации всех тканей, кроме тел позвонков и ребер, используются две CNN с собственной архитектурой, напоминающей U-Net 41 [62]. Среди отобранных публикаций присутствовали две работы, где для сегментации использовались иные архитектуры – DeepLab V3+ [16] и SegResNet [63]. Данные архитектуры используются для решения задач семантической сегментации – выделения на одном изображении областей, относящихся к разным классам объектов.

Часть ПО в обозреваемых публикациях соответствовала второму подходу, полностью решая проблему необходимости вмешательства врача-рентгенолога. Поиск нужного среза производится с помощью CNN на основе двух архитектур – DenseNet [64] и ResNet-18 [65].

Существует также несколько коммерчески доступных открытых решений со сходным функционалом, которые были использованы в обозреваемых работах: AiD-U (Южная Корея), DeepCatch (Южная Корея), Quantib body composition (Нидерланды), Visage 7.1 (США).

Таблица 2

Пороговые значения скелетно-мышечного индекса на уровне тела позвонка L3 для диагностики саркопении
Threshold values of the musculoskeletal index at the L3 vertebral body level for the diagnosis of sarcopenia

N	Зависимость от индекса массы тела (ИМТ)?	Пороговое значение СМИ для мужчин ($\text{см}^2/\text{м}^2$)	Пороговое значение СМИ для женщин ($\text{см}^2/\text{м}^2$)	Источник	Работы, где использованы данные пороговые значения	Страна
1	Да, для мужчин	ИМТ $\geq 25 - 53$; ИМТ $< 25 - 43$	41	Martin L et al [53]	Laur O et al [20]	США
2	Да, в т.ч. в зависимости от возраста	ИМТ $< 23: < 65 \text{ лет} - 45,25; \geq 65 \text{ лет} - 48,86$; ИМТ $\geq 23: < 65 \text{ лет} - 54,89; \geq 65 \text{ лет} - 49,66$	ИМТ $< 23: < 65 \text{ лет} - 37,39; \geq 65 \text{ лет} - 38,85$; ИМТ $\geq 23: < 65 \text{ лет} - 44,9; \geq 65 \text{ лет} - 49,84$	Kim DW et al [27]	Kim DW et al. [27]	Южная Корея
3	Нет	55	39	Fearon K et al [54]	Jullien M. et al [17] Han Q et al [18] Kim SI et al [21] Massaad E et al [23] Nandakumar B et al [29] Borrelli A et al [33] Magudia K et al [9] Lee JH et al [32] Choi SJ et al [38] Hanna PE et al [49]	Франция Южная Корея Южная Корея США США Италия США Южная Корея Южная Корея США
4	Нет	52,4	38,5	Prado CM et al [55]	Fischer S et al [10] Beetz NL et al [26] Beetz NL et al [25] Lee JY et al [30] Just IA et al [43] Suthakaran R et al [47]	Великобритания Германия Германия Южная Корея Германия Австралия
5	Нет	51,9	41	Faron A et al [22]	Faron A et al [22]	Германия
6	Нет	50	39	Carey EJ et al [56]	Mangana Del Rio T et al [36]	Швейцария
7	Нет	49	31	Lee JS et al [57]	Kim J et al [16]	Южная Корея
8	Нет	45,4	34,4	Morley JE et al [58]	Graffy PM et al [6] Souza ACDAH et al [41]	США США
9	Нет	43,75	38,5	Prado CM et al [59]	HsuTH et al [13]	США
10	Нет	41,9	39,2	Lee MW et al [45]	Lee MW et al [45]	Южная Корея
11	Нет	41,2	33	Lee SA et al [14]	Lee SA et al [14]	Южная Корея
12	Нет	41,05	42,44	Pekař M et al [48]	Pekař M et al [48]	Чехия
13	Нет	40,96	30,6	Yoon JK et al [12]	Yoon JK et al [12]	Южная Корея
14	Нет	40,8	34,9	Zhuang CL et al [60]	He M et al [34] Park SJ et al [35]	Китай Южная Корея
15	Нет	39,33	27,77	Yoon JK et al [12]	Yoon JK et al [12]	Южная Корея

Клиническое применение

Анализ работ показал, что спектр основных патологических состояний, при которых исследователи применяли ПО на основе ИИ для оценки скелетной мышечной ткани, довольно широк. Наиболее весомую долю (24 из 46, 52,2 %) составляют работы, где когорта представлена пациентами с онкологическими заболеваниями: распространенный плоскоклеточный рак легкого [11], рак эндометрия [7; 21], метастатический кастрационно-резистентный рак предстательной железы [10], протоковая аденокарцинома поджелудочной железы [13, 15, 26–28; 44, 45], рак желудка [16, 34], колоректальный рак [31; 39], меланома [22], рак шейки матки [18], диффузная В-клеточная лимфома [17], множественная миелома [29], рак мочевого пузыря и/или мочевых путей [19, 33], рак полости рта [51]. Дополнительно стоит отметить работу, где когорту составляли пациенты с метастатическим поражением позвоночника [23].

В данных работах изучались прогностические возможности диагностики саркопении для оценки исходов основного заболевания.

Отдельно стоит указать работу, где рассмотрена выборка без уточнения первично пораженного органа [49], основной целью которой являлась оценка корреляции между морфометрическими показателями и расхождением между расчётной СКФ по креатинину и расчётной СКФ по цистатину С.

Следующая часть работ (6 из 46, 13 %) включает в себя те, где когорта представлена пациентами с соматическими заболеваниями: болезнь Крона [30], острые печеночные недостаточности, развившаяся на фоне хронической (ОПХН) [36], SARS-CoV-2 [28], боковой амиотрофический склероз [38], микроваскулярная стенокардия [41], ряд метаболических нарушений (метаболический синдром, остеопороз, определенная иными методами диагностики саркопения) [50].

В данных работах также изучались прогностические возможности диагностики саркопении для оценки исхода заболевания.

Дополнительно можно выделить публикации по перспективности оценки саркопении для предсказания исхода обширного хирургического вмешательства (6 из 46, 13 %): трансплантация почки [25], трансплантация печени [35], традиционная хирургическая замена аортального клапана [14], транскатетерная имплантация аортального клапана (TAVI) [48], реконструктивно-восстановительное вмешательство после операции Гартмана [47], установка левожелудочковой системы вспомогательного кровообращения на фоне сердечной недостаточности [43].

Только в одной работе из отобранных ИИ использовался для оценки скелетной мышечной ткани у гериатрических пациентов, что было сделано в рамках оппортунистического скрининга синдрома старческой хрупкости [20].

В большинстве исследований (35 из 46, 76,1 %) [7, 8, 11, 13, 14, 16–19, 21–23, 25–38, 43–45, 47, 48, 50, 51] оценивались маркеры саркопении, миостеатоза, изменения морфометрических характеристик жировой ткани в качестве независимых предикторов клинических исходов основного заболевания (общая и безрецидивная выживаемость, выживаемость без прогрессирования, смертность), ухудшения его степени, вероятности развития осложнений после хирургических вмешательств. Наиболее часто оценивалась взаимосвязь морфометрических параметров и выживаемости. Ниже представлена обобщающая таблица, охватывающая работы, где изучалось влияние данных маркеров на общую выживаемость, выраженную в отношении рисков (ОР) и отношении шансов (ОШ) с соответствующими 95 % доверительными интервалами (ДИ) по результатам многофакторного анализа (табл. 3). В таблицу были вынесены параметры с наибольшим ОР и ОШ из имеющихся.

В некоторых исследованиях было выявлено отрицательное влияние наличия саркопении (или же сниженной площади/объема скелетной мышечной ткани) на выживаемость. Этот эффект отмечался у пациентов с протоковой аденокарциномой поджелудочной железы – ОР 1,40 (95 % ДИ 0,94–2,10) по многофакторному анализу для общей выживаемости [27], множественной миеломой – ОР 1,62 (95 % ДИ 1,02–2,56) по многофакторному анализу для общей выживаемости) [29], ОПХН – ОШ 2,76 (95 % ДИ 1,07–7,11) по многофакторному анализу для 28-дневной смертности по показателям на первый день после госпитализации) [36]. Уменьшение площади скелетной мышечной ткани также негативно влияло на активность и частоту обострений при болезни Крона – ОШ 1,21 (95 % ДИ 1,03–1,42) для наступления ремиссии) [30], а также негативно сказывалось на вероятности возникновения микрососудистой стенокардии с возможными неблагоприятными исходами, такими как сердечная недостаточность, особенно у женщин – ОШ 1,38 (95 % ДИ 1,08–1,75) в контексте снижения СМИ на каждые 10 см²/м² для возникновения коронарной микро-васкулярной дисфункции; ОР 1,87 (95 % ДИ 1,30–2,69) в контексте снижения СМИ на каждый 10 см²/м² для вероятности госпитализации по поводу возникновения острой сердечной недостаточности [41].

Тем не менее, не во всех работах было выявлено значимое влияние именно снижения скелетной мышечной массы или объема на исходы. Отсутствует статистически значимое влияние низких показателей СМИ на выживаемость у пациенток с раком эндометрия [7], а также на повышение маркеров системного воспаления у пациентов с раком желудка [34].

Для пациентов с диффузной В-клеточной лимфомой наиболее значимым для оценки клинического прогноза оказалось снижение РПСМТ – ОР 2,22 (95 % ДИ 1,04–4,70) по многофакторному анализу для общей выживаемости; 2,06 (95 % ДИ 1,16–3,67) – для безрецидивной выживаемости) [17]. Адипопения, определенная как снижение общего объемного индекса жировой ткани, являлась независимым прогностическим фактором у пациентов с боковым амиотрофическим склерозом – ОР 5,94 (95 % ДИ 1,01 – 35,0) по многофакторному анализу для общей выживаемости) [38].

Дополнительным параметром, изучаемым в ряде работ [6, 8, 17, 23, 27, 34, 37] и заслуживающим отдельного упоминания, является РПСМТ. Данный параметр авторами используется для определения наличия или отсутствия миостеатоза. К сожалению, общепринятых пороговых значений для подтверждения наличия миостеатоза на данный момент не существует, поэтому

авторы используют различные значения, определенные для соответствующих когорт. Как было сказано выше [17], РПСМТ в определенных ситуациях также выступает как независимый прогностический маркер. Снижение РПСМТ было связано с увеличением длительности госпитализации (более 7 дней) у пациентов после хирургического вмешательства с метастатическим поражением позвоночника (среднее значение 30,87 против 35,23 HU, (95 % ДИ 1,98–6,73) [23]. У пациентов с резекционной протоковой аденокарциномой поджелудочной железы снижение РПСМТ, как и саркопения, было связано с ухудшением общей и безрецидивной выживаемости – ОР 1,68 (95 % ДИ 1,16–2,43) при многофакторном анализе для общей выживаемости; ОР 1,35 (95 % ДИ 0,93–1,96) при многофакторном анализе для безрецидивной выживаемости) [27].

Отдельно стоит отметить наличие работ, где оцениваемым параметром скелетной-мышечной ткани является не её площадь, а объём, измеряемый в см³ [16, 25, 28, 32, 36, 51]. На КТ-изображениях органов брюшной полости объем измерялся либо на уровне талии (от нижнего края 12-ого ребра до гребня подвздошной кости), либо на уровне всей зоны сканирования. Наиболее нестандартным предметом исследования среди данной части работ являлся объём жевательных мышц [51]: была выявлена связь между снижением выявленного с помощью ИИ объема жевательных мышц и снижением общей выживаемости у пациентов с раком полости рта.

Научное применение

Нельзя не отметить долю публикаций, где ПО на основе ИИ было успешно использовано для проведения популяционного исследования с целью получения референсных пороговых значений для скелетной мышечной ткани и иных морфометрических параметров (в т.ч. в педиатрической когорте пациентов) [9, 12, 24, 40, 46], оценки связи состояния скелетной мышечной ткани и общей смертности и/или выживаемости в условно здоровой популяции [8], а также оппортунистической оценки динамики изменения данных показателей [6]. Отдельного упоминания заслуживает работа, основной целью которой являлась оценка точности использования общепринятой формулы расчета L3 СМИ (в частности использование квадрата роста в качестве знаменателя) и её сравнение с формулой, предложенной авторами (использование роста без возвведения в квадрат в качестве знаменателя) [42]. Было показано, что при использовании показателя степени «1», а не «2», прогностическая способность L3 СМИ увеличивалась как для мужчин, так и для женщин (индексы конкордантности 0,675 против 0,663 для мужчин и 0,664 против 0,653 для женщин, оба показателя имели высокую статистическую значимость).

Таким образом, подобное ПО может быть полезным инструментом в научных исследованиях с крайне большим размером выборки (более нескольких тысяч человек).

Обсуждение

Проведённый обзор публикаций демонстрирует разнообразие потенциальных клинических и научных применений ПО на базе технологий ИИ для оценки различных морфометрических параметров по КТ-изображениям. Большое количество исследований, направленных на оценку морфометрических показателей как независимых предикторов клинических исходов, свидетельствует о значительном интересе научного сообщества к этой теме. Объектами исследования становятся не только онкологические заболевания, но и состо-

Таблица 3

Влияние изменения морфометрических параметров мышечной и жировой тканей на общую выживаемость

The effect of changes in morphometric parameters of muscle and adipose tissues on overall survival

Авторы	Патология	Морфометрический параметр	ОП (95 % ДИ)	ОШ (95 % ДИ)	p-значение
Мышечная ткань					
Kim SI et al [21]	Рак эндометрия	↓ ОМ (уровень талии)	5,964 (1,296–27,448)	–	0,022
Lee J et al [11]	Прогрессирующий плоскоклеточный рак лёгкого	↓ ПСМ (L1)	5,74 (2,94–11,24)	–	<0,001
Borrelli A et al [33]	Прогрессирующая уротелиальная опухоль верхних мочевыводящих путей, мочевого пузыря	↓ L3 СМИ (до лечения) ↓ L3 СМИ (после лечения)	3,31 (1,56–7,04) 2,81 (1,35–5,83)	–	0,002 0,005
Han Q et al [18]	Плоскоклеточный и железисто-плоскоклеточный рак шейки матки	↓ ОМ (уровень талии)	3,004 (1,052–8,574)	–	0,04
Jullien M et al [17]	Диффузная крупноклеточная В-клеточная лимфома	↓ РПСМТ (L3)	2,8 (1,58–4,95)	–	<0,001
Kim M et al [39]	Колоректальный рак	↓ ОМ (уровень талии) и ↓ РПСМТ (L3)	1,95 (1,08–3,54)	–	0,027
Lee SA et al [14]	Состояние после традиционной хирургической замены аортального клапана	↓ ПСМ (L3)	–	1,92 (1,39–2,70)	<0,001
Hsu TH et al [13]	Рак поджелудочной железы	↓ L3 СМИ	1,85 (1,02–3,33)	–	–
Gillen J et al [7]	Рак эндометрия	↓ ПСМ (m. psoas)	1,83 (0,34–1,72)	–	0,09
Lee JH et al [32]	Нет (когорта пациентов, прошедших чек-ап)	↓ L3 СМИ	1,73 (1,16–2,58)	–	0,007
Kim DW et al [27]	Резектабельная протоковаяadenокарцинома поджелудочной железы	↓ L3 СМИ и ↓ РПСМТ (L3)	1,68 (1,16–2,43)	–	0,006
Pekař M et al [48]	Состояние после транскатетерной имплантации аортального клапана (TAVI)	↓ L3 СМИ (у мужчин)	1,651 (1,258–2,167)	–	<0,001
Ying T et al [19]	Рак мочевого пузыря	↓ ОМ (туловище)	1,62 (1,07–2,44)	–	0,022
He M et al [34]	Прогрессирующий рак желудка	↓ L3 СМИ	1,410 (0,860–2,311)	–	0,173
Choi SJ et al [38]	Боковой амиотрофический склероз	↓ L3 СМИ	0,72 (0,11–4,57)	–	0,73
Жировая ткань					
Choi SJ et al [38]	Боковой амиотрофический склероз	↓ Объемный индекс жировой ткани (общий)	5,94 (1,01–35,0)	–	0,049
Gillen J et al [7]	Рак эндометрия	↓ ПЖТ (висцеральная)	1,68 (0,92–3,05)	–	0,09
Pekař M et al [48]	Состояние после транскатетерной имплантации аортального клапана (TAVI)	↓ РПЖТ (подкожная, у мужчин) ↓ РПЖТ (висцеральная, у мужчин)	1,428 (1,092–1,867) 1,336 (1,030–1,734)	–	0,009 0,029
Lee JH et al [32]	Нет (когорта пациентов, прошедших чек-ап)	↓ РПЖТ (висцеральная)	1,05 (1,02–1,08)	–	0,001
Мышечная и жировая ткань					
Kim J et al [16]	Рак желудка	↓ L3 СМИ и ↑ ПЖТ (висцеральная)	2,645 (1,333–5,249)	–	–

Примечание: СМИ – скелетно-мышечный индекс, ПСМ – площадь скелетной мышечной ткани, ПЖТ – площадь жировой ткани, ОМ – объем мышечной ткани, РПСМТ – рентгеновская плотность скелетной мышечной ткани, РПЖТ – рентгеновская плотность жировой ткани

ятия после серьезных хирургических вмешательств, где оценка влияния на исходы послеоперационного периода также представляет интерес. Кроме того, для части патологических состояний актуально использование в качестве предикторов не только скелетно-мышечных, но и иных морфометрических показателей состава тела, связанных с висцеральной и подкожной жировой тканью. В данном контексте нельзя не упомянуть и саркопеническое ожирение, которое тоже имеет место у ряда пациентов. Также свою пользу алгоритмы ИИ показывают в качестве инструмента обработки большого количества КТ-изображений, что особенно важно для популяционных исследований.

В настоящее время доступно большое количество технических решений, с достаточно высокой точностью сегментации. Несмотря на практически повсеместное использование архитектуры U-Net и её вариантов, имеются и альтернативные подходы. При невозможности использования по тем или иным причинам готовых решений, исследователи могут рассмотреть вариант разработки собственного алгоритма, с применением как самостоятельно размеченных в соответствующем ПО, так и публично доступных КТ-изображений [66]. Использование полностью автоматизированного подхода, где срез для анализа выбирается без вмешательства врача-рентгенолога, при надлежащей интеграции в PACS открыва-

ет возможность оппортунистического получения морфометрических данных в рутинных КТ-исследованиях. Это может быть актуально и в контексте комплексной гериатрической оценки вместе с оценкой остеопороза. Данный процесс должен учитывать и выбор корректной серии, а именно – бесконтрастной. В стандартной методологии определения состава тела по КТ-изображениям предполагается использование бесконтрастных серий, т.к. введение контраста может повлиять на плотностные характеристики визуализируемых тканей и скомпрометировать их [67]. Техническим ограничением, которое может помешать повсеместному использованию данного ПО, является недостаточная вычислительная мощность оборудования, однако его можно обойти при использовании удалённых серверов. Более того, перед непосредственным внедрением данного ПО в клиническую практику, а также непосредственно в процессе его работы в учреждениях здравоохранения следует производить соответствующий контроль качества.

Наиболее существенным недостатком, который можно отметить во всех проанализированных работах, является отсутствие конкретных предложений по использованию получаемых морфометрических показателей в рамках привычных для врачей клинических специальностей инструментов – системах оценки риска возникновения неблагоприятных клинических исходов для конкретных заболеваний, часто представляемых различными шкалами и калькуляторами. Следовательно, в настоящее время нет четкого понимания того, как именно лечащий врач должен действовать при обнаружении снижения тех или иных морфометрических параметров у пациента. Решению данной проблемы не способствует также и отсутствие единых пороговых значений индексов для установления факта наличия саркопении, миостеатоза. Также стоит отметить, что в настоящее время не существует общепринятой позиции касательно необходимости отслеживания морфометрических показателей состава тела в динамике. Таким образом, доказательно рекомендовать проведение КТ-оценки исключительно в целях оценки данных показателей в динамике не представляется возможным.

В контексте оппортунистического скрининга оценка динамики всё ещё возможна при наличии последующих КТ-исследований, например – проведенных для оценки динамики основного заболевания. В таком случае распоряжение полученной дополнительно клинической информацией остаётся сугубо на усмотрение лечащего врача.

Несмотря на обозначенные проблемы, прогностическая ценность отдельных морфометрических параметров всё же признаётся исследователями. Их интеграция в существующую тактику ведения пациентов с различными основными заболеваниями представляется перспективным направлением для будущих научных исследований с применением алгоритмов ИИ. Кроме того, использование подобного ПО может помочь и в получении унифицированных пороговых значений, для чего необходимы дальнейшие популяционные исследования на выборке здоровых людей.

Ограничениями данного обзора можно назвать узкое применение доступных электронных библиографических баз, а также отсутствие оценки критерии качества включенных работ ввиду их большой разнородности.

Заключение

Спектр имеющихся клинических и научных вариантов применения ПО на основе технологий ИИ для оценки морфометрических параметров по КТ-изображениям достаточно широк и включает в себя применение при самых разных заболеваниях. Несмотря на отсутствие четкого места в клинико-диагностической парадигме в данный момент времени, использование ИИ в перспективе может позволить улучшить индивидуальный подход к каждому пациенту, а также послужить хорошим инструментом в научных исследованиях (в частности – популяционных). При оценке скелетной мышечной ткани стоит обращать внимание не только на общепринятый L3 скелетно-мышечный индекс, но и на рентгеновскую плотность скелетной мышечной ткани. Наиболее изученными и точными для оценки морфометрических параметров моделями ИИ остаются примеры ПО на основе архитектуры U-Net и её производных.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

- Cruz-Jentoft A.J., Bahat G., Bauer J., et al. Sarcopenia: Revised European Consensus on Definition and Diagnosis. *Age Ageing*. 2019;48:1:16-31. doi:10.1093/ageing/afy169
- Correa-de-Araujo R., Addison O., Miljkovic I., et al. Myosteatosis in the Context of Skeletal Muscle Function Deficit: an Interdisciplinary Workshop at the National Institute on Aging. *Front Physiol*. 2020;11:963. doi:10.3389/fphys.2020.00963
- Kelly B.S., Judge C., Bolland S.M., et al. Radiology Artificial Intelligence: a Systematic Review and Evaluation of Methods (Raise). *Eur Radiol*. 2022;32:11:7998-8007. doi:10.1007/s00330-022-08784-6
- Lenchik L., Boutin R. Sarcopenia: Beyond Muscle Atrophy and into the New Frontiers of Opportunistic Imaging, Precision Medicine, and Machine Learning. *Semin Musculoskelet Radiol*. 2018;22:03:307-322. doi:10.1055/s-0038-1641573
- Graffy P.M., Liu J., Pickhardt P.J., Burns J.E., Yao J., Summers R.M. Deep Learning-Based Muscle Segmentation and Quantification at Abdominal CT: Application to a Longitudinal Adult Screening Cohort for Sarcopenia Assessment. *Br J Radiol*. 2019;92:1100:20190327. doi:10.1259/bjr.20190327
- Gillen J., Mills K.A., Dvorak J., et al. Imaging Biomarkers of Adiposity and Sarcopenia as Potential Predictors for Overall Survival among Patients with Endometrial Cancer Treated with Bevacizumab. *Gynecol Oncol Rep*. 2019;30:100502. doi:10.1016/j.gore.2019.100502
- Lenchik L., Barnard R., Boutin R.D., et al. Automated Muscle Measurement on Chest CT Predicts All-Cause Mortality in Older Adults From the National Lung Screening Trial. *J Gerontol Ser A*. 2021;76:2:277-285. doi:10.1093/gerona/glaa141
- Magudia K., Bridge C.P., Bay C.P., et al. Population-Scale CT-based Body Composition Analysis of a Large Outpatient Population Us ing Deep Learning to Derive Age-, Sex-, and Race-Specific Reference Curves. *Radiology*. 2021;298:2:319-329. doi:10.1148/radiol.2020201640
- Fischer S., Clements S., McWilliam A., et al. Influence of Abiraterone and Enzalutamide on Body Composition in Patients with Metastatic Castration Resistant Prostate Cancer. *Cancer Treat Res Commun*. 2020;25:100256. doi:10.1016/j.ctarc.2020.100256.
- Lee J., Kim E.Y., Kim E., et al. Longitudinal Changes in Skeletal Muscle Mass in Patients with Advanced Squamous Cell Lung Cancer. *Thorac Cancer*. 2021;12:11:1662-1667. doi:10.1111/1759-7714.13958
- Yoon J.K., Lee S., Kim K.W., et al. Reference Values for Skeletal Muscle Mass at the Third Lumbar Vertebral Level Measured by Computed Tomography in a Healthy Korean Population. *Endocrinol Metab*. 2021;36:3:672-677. doi:10.3803/EnM.2021.1041
- Hsu T.M.H., Schawkat K., Berkowitz S.J., et al. Artificial Intelligence to Assess Body Composition on Routine Abdominal CT Scans and Predict Mortality in Pancreatic Cancer – a Recipe for Your Local Application. *Eur J Radiol*. 2021;142:109834. doi:10.1016/j.ejrad.2021.109834
- Lee S.A., Jang I.Y., Park S.Y., et al. Benefit of Sarcopenia Screening in Older Patients Undergoing Surgical Aortic Valve Replacement. *Ann Thorac Surg*. 2022;113:6:2018-2026. doi:10.1016/j.athoracsur.2021.06.067
- Kong H.H., Kim K.W., Ko Y.S., et al. Longitudinal Changes in Body Composition of Long-Term Survivors of Pancreatic Head Cancer and Factors Affecting the Changes. *J Clin Med*. 2021;10:15:3436. doi:10.3390/jcm10153436
- Kim J., Han S.H., Kim H. Detection of Sarcopenic Obesity and Prediction of Long-Term Survival in Patients with Gastric Cancer Using Preoperative Computed Tomography and Machine Learning. *J Surg Oncol*. 2021;124:8:1347-1355. doi:10.1002/jso.26668

16. Jullien M., Tessoulin B., Ghesquieres H., et al. Deep-Learning Assessed Muscular Hypodensity Independently Predicts Mortality in DLBCL Patients Younger than 60 Years. *Cancers.* 2021;13:18:4503. doi:10.3390/cancers13184503
17. Han Q., Kim S.I., Yoon S.H., et al. Impact of Computed Tomography-Based, Artificial Intelligence-Driven Volumetric Sarcopenia on Survival Outcomes in Early Cervical Cancer. *Front Oncol.* 2021;11:741071. doi:10.3389/fonc.2021.741071
18. Ying T., Borrelli P., Edenbrandt L., et al. Automated Artificial Intelligence-Based Analysis of Skeletal Muscle Volume Predicts Overall Survival after Cystectomy for Urinary Bladder Cancer. *Eur Radiol Exp.* 2021;5;1:50. doi:10.1186/s41747-021-00248-8
19. Laur O., Weaver M.J., Bridge C., et al. Computed Tomography-Based Body Composition Profile as a Screening Tool for Geriatric Frailty Detection. *Skeletal Radiol.* 2022;51;7:1371-1380. doi:10.1007/s00256-021-03951-0
20. Kim S.I., Chung J.Y., Paik H., et al. Prognostic Role of Computed Tomography-Based, Artificial Intelligence-Driven Waist Skeletal Muscle Volume in Uterine Endometrial Carcinoma. *Insights Imaging.* 2021;12;1:192. doi:10.1186/s13244-021-01134-y
21. Faron A., Opheys N.S., Nowak S., et al. Deep Learning-Based Body Composition Analysis Predicts Outcome in Melanoma Patients Treated with Immune Checkpoint Inhibitors. *Diagnostics.* 2021;11;12:2314. doi:10.3390/diagnostics11122314
22. Massaad E., Bridge C.P., Kiapour A., et al. Evaluating Frailty, Mortality, and Complications Associated with Metastatic Spine Tumor Surgery Using Machine Learning-Derived Body Composition Analysis. *J Neurosurg Spine.* 2022;37;2:263-273. doi:10.3171/2022.1.SPINE211284
23. Somasundaram E., Castiglione J.A., Brady S.L., Trout A.T. Defining Normal Ranges of Skeletal Muscle Area and Skeletal Muscle Index in Children on CT Using an Automated Deep Learning Pipeline: Implications for Sarcopenia Diagnosis. *Am J Roentgenol.* 2022;219;2:326-336. doi:10.2214/AJR.21.27239
24. Beetz N.L., Geisel D., Shnayien S., et al. Effects of Artificial Intelligence-Derived Body Composition on Kidney Graft and Patient Survival in the Eurotransplant Senior Program. *Biomedicines.* 2022;10;3:554. doi:10.3390/biomedicines10030554
25. Beetz N.L., Geisel D., Maier C., et al. Influence of Baseline CT Body Composition Parameters on Survival in Patients with Pancreatic Adenocarcinoma. *J Clin Med.* 2022;11;9:2356. doi:10.3390/jcm11092356
26. Kim D.W., Ahn H., Kim K.W., et al. Prognostic Value of Sarcopenia and Myosteatosis in Patients with Resectable Pancreatic Ductal Adenocarcinoma. *Korean J Radiol.* 2022;23;11:1055. doi:10.3348/kjr.2022.0277
27. Hosch R., Kattner S., Berger M.M., et al. Biomarkers Extracted by Fully Automated Body Composition Analysis from Chest CT Correlate with SARS-CoV-2 Outcome Severity. *Sci Rep.* 2022;12;1:16411. doi:10.1038/s41598-022-20419-w
28. Nandakumar B., Baffour F., Abdallah N.H., et al. Sarcopenia Identified by Computed Tomography Imaging Using a deep Learning-Based Segmentation Approach Impacts Survival in Patients with Newly Diagnosed Multiple Myeloma. *Cancer.* 2023;129;3:385-392. doi:10.1002/cncr.34545
29. Lee J.Y., Kim K.W., Ko Y., et al. Serial Changes in Body Composition and the Association with Disease Activity during Treatment in Patients with Crohn's Disease. *Diagnostics.* 2022;12;11:2804. doi:10.3390/diagnostics12112804
30. Keyl J., Hosch R., Berger A., et al. Deep Learning-Based Assessment of Body Composition and Liver Tumour Burden for Survival Modelling in Advanced Colorectal Cancer. *J Cachexia Sarcopenia Muscle.* 2023;14;1:545-552. doi:10.1002/jcsm.13158
31. Lee J.H., Choi S.H., Jung K.J., Goo J.M., Yoon S.H. High Visceral Fat Attenuation and Long-Term Mortality in a Health Check-Up Population. *J Cachexia Sarcopenia Muscle.* 2023;14;3:1495-1507. doi:10.1002/jcsm.13226
32. Borrelli A., Pecoraro M., Del Giudice F., et al. Standardization of Body Composition Status in Patients with Advanced Urothelial Tumors: the Role of a CT-Based AI-Powered Software for the Assessment of Sarcopenia and Patient Outcome Correlation. *Cancers.* 2023;15;11:2968. doi:10.3390/cancers15112968
33. He M., Chen Z.F., Zhang L., et al. Associations of Subcutaneous Fat Area and Systemic Immune-inflammation Index with Survival in Patients with Advanced Gastric Cancer Receiving Dual PD-1 and HER2 Blockade. *J Immunother Cancer.* 2023;11;6:e007054. doi:10.1136/jitc-2023-007054
34. Park J.S., Yoon J.H., Joo I., Lee J.M. Newly Developed Sarcopenia after Liver Transplantation, Determined by a Fully Automated 3D Muscle Volume Estimation on Abdominal CT, can Predict Post-Transplant Diabetes Mellitus and Poor Survival Outcomes. *Cancer Imaging.* 2023;23;1:73. doi:10.1186/s40644-023-00593-4
35. Mangana Del Rio T., Sacleux S.C., Vionnet J., et al. Body Composition and Short-Term Mortality in Patients Critically Ill with Acute-on-Chronic Liver Failure. *JHEP Rep.* 2023;5;8:100758. doi:10.1016/j.jhepr.2023.100758
36. Nowak S., Kloth C., Theis M., et al. Deep Learning-Based Assessment of CT Markers of Sarcopenia and Myosteatosis for Outcome Assessment in Patients with Advanced Pancreatic Cancer after High-Intensity Focused Ultrasound Treatment. *Eur Radiol.* Published Online August 12, 2023. 2024 Jan;34;1:279-286. doi:10.1007/s00330-023-09974-6
37. Choi S., Yoon S.H., Sung J., Lee J.H. Association Between Fat Depletion and Prognosis of Amyotrophic Lateral Sclerosis: CT -Based Body Composition Analysis. *Ann Neurol.* 2023;94;6:1116-1125. doi:10.1002/ana.26775
38. Kim M., Lee S.M., Son I.T., Park T., Oh B.Y. Prognostic Value of Artificial Intelligence-Driven, Computed Tomography-Based, Volumetric Assessment of the Volume and Density of Muscle in Patients with Colon Cancer. *Korean J Radiol.* 2023;24;9:849. doi:10.3348/kjr.2023.0109
39. Tonnesen P.E., Mercaldo N.D., Tahir I., et al. Muscle Reference Values From Thoracic and Abdominal CT for Sarcopenia Assessment: the Framingham Heart Study. *Invest Radiol.* 2024 Mar 1;59;3:259-270. doi:10.1097/RLI.00000000000001012
40. Souza A.C., Rosenthal M.H., Moura F.A., et al. Body Composition, Coronary Microvascular Dysfunction, and Future Risk of Cardiovascular Events Including Heart Failure. *Jacc Cardiovasc Imaging.* 2024 Feb;17;2:179-191. doi:10.1016/j.jcmci.2023.07.014
41. Blankemeier L., Yao L., Long J., et al. Skeletal Muscle Area on CT: Determination of an Optimal Height Scaling Power and Testing for Mortality Risk Prediction. *Am J Roentgenol.* 2024;222;1:e2329889. doi:10.2214/AJR.23.29889
42. Just I.A., Schoenrath F., Roehrich L., et al. Artificial Intelligence-Based Analysis of Body Composition Predicts Outcome in Patients Receiving Long-Term Mechanical Circulatory Support. *J Cachexia Sarcopenia Muscle.* 2024;15;1:270-280. doi:10.1002/jcsm.13402
43. Keyl J., Bucher A., Jungmann F., et al. Prognostic Value of Deep Learning-Derived Body Composition in Advanced Pancreatic Cancer – a Retrospective Multicenter Study. *Esco Open.* 2024;9;1:102219. doi:10.1016/j.esmoop.2023.102219
44. Lee M.W., Jeon S.K., Paik W.H., et al. Prognostic Value of Initial and Longitudinal Changes in Body Composition in Metastatic Pancreatic Cancer. *J Cachexia Sarcopenia Muscle.* 2024;15;2:735-745. doi:10.1002/jcsm.13437
45. Weston A.D., Grossardt B.R., Garner H.W., et al. Abdominal Body Composition Reference Ranges and Association with Chronic Conditions in an Age- and Sex-Stratified Representative Sample of a Geographically Defined American Population. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci.* 2024;79;4:glae055. doi:10.1093/gerona/glae055
46. Suthakaran R., Cao K., Arafat Y., et al. Body Composition Assessment by Artificial Intelligence Can Be a Predictive Tool for Short-Term Postoperative Complications in Hartmann's Reversals. *BMC Surg.* 2024;24;1:111. doi:10.1186/s12893-024-02408-0
47. Pekar M., Jiravský O., Novák J., et al. Sarcopenia and Adipose Tissue Evaluation by Artificial Intelligence Predicts the Overall Survival after TAVI. *Sci Rep.* 2024;14;1:8842. doi:10.1038/s41598-024-59134-z
48. Hanna P.E., Ouyang T., Tahir I., et al. Sarcopenia, Adiposity and Large Discordance between Cystatin C and Creatinine-Based Estimated Glomerular Filtration Rate in Patients with Cancer. *J Cachexia Sarcopenia Muscle.* 2024;15;3:1187-1198. doi:10.1002/jcsm.13469
49. Cho S.W., Baek S., Han S., et al. Metabolic Phenotyping with Computed Tomography Deep Learning for Metabolic Syndrome, Osteoporosis and Sarcopenia Predicts Mortality in Adults. *J Cachexia Sarcopenia Muscle.* 2024 Aug;15;4:1418-1429. doi:10.1002/jcsm.13487
50. Sakamoto K., Hiraoka S. ichiro, Kawamura K., et al. Automated Evaluation of Masseter Muscle Volume: deep Learning Prognostic Approach in Oral Cancer. *BMC Cancer.* 2024;24;1:128. doi:10.1186/s12885-024-11873-y
51. Shen W., Punyanitya M., Wang Z., et al. Total Body Skeletal Muscle and Adipose Tissue Volumes: Estimation from a Single Abdominal Cross-Sectional Image. *J Appl Physiol.* 2004;97;6:2333-2338. doi:10.1152/japplphysiol.00744.2004
52. Martin L., Birdsell L., MacDonald N., et al. Cancer Cachexia in the Age of Obesity: Skeletal Muscle Depletion Is a Powerful Prognostic Factor, Independent of Body Mass Index. *J Clin Oncol.* 2013;31;12:1539-1547. doi:10.1200/JCO.2012.45.2722
53. Fearon K., Strasser F., Anker S.D., et al. Definition and Classification of Cancer Cachexia: an International Consensus. *Lancet Oncol.* 2011;12;5:489-495. doi:10.1016/S1470-2045(10)70218-7
54. Prado C.M., Lieffers J.R., McCargill L.J., et al. Prevalence and Clinical Implications of Sarcopenic Obesity in Patients with Solid Tumours of the Respiratory and Gastrointestinal Tracts: a Population-Based Study. *Lancet Oncol.* 2008;9;7:629-635. doi:10.1016/S1470-2045(08)70153-0
55. Carey E.J., Lai J.C., Wang C.W., et al. A Multicenter Study to Define Sarcopenia in Patients with End-Stage Liver Disease. *Liver Transplant off Publ Am Assoc Study Liver Dis Int Liver Transplant Soc.* 2017;23;5:625-633. doi:10.1002/ltr.24750
56. Jong S.L., Young S.K., Eun Young K., Wook J. Prognostic Significance of CT-Determined Sarcopenia in Patients with Advanced Gastric Cancer | PLOS ONE. 2018 Aug 20;13;8:e0202700. <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0202700>

57. Morley J.E., Anker S.D., von Haehling S. Prevalence, Incidence, and Clinical Impact of Sarcopenia: Facts, Numbers, and Epidemiology-Update 2014. *J Cachexia Sarcopenia Muscle.* 2014;5:4:253-259. doi:10.1007/s13539-014-0161-y
58. Prado C.M.M., Baracos V.E., McCargar L.J., et al. Sarcopenia as a Determinant of Chemotherapy Toxicity and Time to Tumor Progression in Metastatic Breast Cancer Patients Receiving Capecitabine Treatment. *Clin Cancer Res off J Am Assoc Cancer Res.* 2009;15:8:2920-2926. doi:10.1158/1078-0432.CCR-08-2242
59. Zhuang C.L., Huang D.D., Pang W.Y., et al. Sarcopenia is an Independent Predictor of Severe Postoperative Complications and Long-Term Survival after Radical Gastrectomy for Gastric Cancer: Analysis from a Large-Scale Cohort. *Medicine (Baltimore).* 2016;95:13:e3164. doi:10.1097/MD.0000000000003164
60. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015. Lecture Notes in Computer Science.* Springer International Publ., 2015:234-241. doi:10.1007/978-3-319-24574-4_28
61. Trägårdh E, Borrelli P, Kabotek R, et al. Recomia – a Cloud-Based Platform for Artificial Intelligence Research in Nuclear Medicine and Radiology. *EJNMMI Phys.* 2020;7:51. doi:10.1186/s40658-020-00316-9
62. Myronenko A. 3D MRI Brain Tumor Segmentation Using Autoencoder Regularization. Published Online 2018 Nov;1:311-320. doi:10.48550/ARXIV.1810.11654
63. Huang G., Liu Z., van der Maaten L., Weinberger K.Q. Densely Connected Convolutional Networks. 2016;1:069-93. Published online January 28, 2018. doi:10.48550/arXiv.1608.06993
64. Yushkevich P.A., Piven J., Hazlett H.C., et al. User-Guided 3D Active Contour Segmentation of Anatomical Structures: Significantly Improved Efficiency and Reliability. *NeuroImage.* 2006;31:3:1116-1128. doi:10.1016/j.neuroimage.2006.01.015
65. Сморчкова А.К., Петряйкин А.В., Арtyukova З.Р. MosMedData: набор диагностических компьютерно-томографических изображений органов брюшной полости на уровне L3 позвонка с сегментацией скелетной мышечной и внутримышечной жировой тканей: Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2023624494; Российская Федерация; заявл. 28.11.2023; опубл. 08.12.2023 [Smorchkova A.K., Petryaykin A.V., Artyukova Z.R. MosMedData: Nabor Diagnosticheskikh Kompyuterno-Tomograficheskikh Izobrazheniy Organov Bryuschnoy Polosti na Urovne L3 Pozvonka s Segmentatsiyey Skeletnoy Myshechnoy i Vnutrimshechnoy Zhirovoy Tkaney = MosMedData: a Set of Diagnostic Computed Tomographic Images of Abdominal Organs at the Level of the L3 Vertebra with Segmentation of Skeletal Muscle and Intramuscular Adipose Tissue. Certificate of State Registration of the Database No. 2023624494. Russian Federation, declared 28.11.2023, published 08.12.2023 (In Russ.)].
66. van Vugt J.L.A., Coebergh van den Braak R.R.J., Schippers H.J.W., et al. Contrast-Enhancement Influences Skeletal Muscle Density, but not Skeletal Muscle Mass, Measurements on Computed Tomography. *Clin Nutr Edinb Scotl.* 2018;37:5:1707-1714. doi:10.1016/j.clnu.2017.07.007
67. Васильев Ю.А., Владзимирский А.В., Омелянская О.В., Арзамасов К.М., Четвериков С.Ф., Румянцев Д.А., Зеленова М.А. Методология тестирования и мониторинга программного обеспечения на основе технологий искусственного интеллекта для медицинской диагностики // Digital Diagnostics. 2023. Т.4. №3. С. 252-267 [Vasil'yev Yu.A., Vladzimirskiy A.V., Omelyanskaya O.V., Arzamasov K.M., Chetverikov S.F., Rumyantsev D.A., Zelenova M.A. Methodology of Testing and Monitoring Software Based on Artificial Intelligence Technologies for Medical Diagnostics. Digital Diagnostics. 2023;4;3:252-267 (In Russ.)]. doi: 10.17816/DD321971

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Данная работа подготовлена авторами в рамках НИОКР «Разработка и создание аппаратно-программного комплекса для опорно-туннельного скрининга остеопороза» (№ ЕГИСУ: 123031400007-7) в соответствии с приказом Департамента здравоохранения города Москвы от 21.12.2022 № 1196 «Об утверждении государственных заданий, финансовое обеспечение которых осуществляется за счёт средств бюджета города Москвы государственным бюджетным (автономным) учреждениям подведомственным Департаменту здравоохранения города Москвы, на 2023 год и плановый период 2024 и 2025 гг.».

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.

Поступила: 20.10.2024. Принята к публикации: 25.11.2024.

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

Financing. This work was prepared by the authors within the framework of R&D «Development and creation of a hardware and software complex for opportunistic screening of osteoporosis» (EGISU No.: 123031400007-7) in accordance with the order of the Department of Health of the City of Moscow dated 12/21/2022 No. 1196 «On approval of state tasks, financial support of which is carried out at the expense of the budget of the city of Moscow to state budgetary (autonomous) institutions subordinated to the Department of Health of the City of Moscow, for 2023 and the planning period 2024 and 2025.»

Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.

Article received: 20.10.2024. Accepted for publication: 25.11.2024.