

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD623240>

Приоритетные параметры радиомического анализа для компьютерной томографии при злокачественных новообразованиях головы и шеи: систематический обзор

Ю.А. Васильев, О.Г. Нанова, И.А. Блохин, Р.В. Решетников,
А.В. Владзимирский, О.В. Омелянская

Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Радиомика — новейшее и многообещающее направление современной лучевой диагностики. Число исследований злокачественных новообразований головы и шеи с помощью этого метода увеличивается с каждым годом. Мы провели систематический обзор новейших публикаций (2021–2023) по злокачественным новообразованиям головы и шеи, выполненным на основе компьютерной томографии.

Цель — систематизация данных по используемым параметрам радиомического анализа при раке головы и шеи, выявленным по данным компьютерной томографии.

Материалы и методы. Поиск статей осуществлялся в базе PubMed. Произведены извлечение базовых характеристик отобранных статей и оценка их качества по RQS 2.0 и модифицированному опроснику QUADAS-CAD. Оценили уровень воспроизводимости радиомических параметров, отобранных для прогностических моделей, в разных исследованиях. Для обзора отобрано 11 статей. В большинстве случаев отмечался высокий риск систематической ошибки, связанный с несбалансированностью выборки по демографическим параметрам и уровню патологий.

Результаты. При оценке качества радиомики диапазон баллов для исследованных статей изменяется от 19,44% до 50,00% максимально возможной суммы. Основные проблемы, влекущие за собой снижение качества исследований, обусловлены отсутствием внешней валидации результатов (73% проанализированных статей), а также недоступностью или непрозрачностью исследовательских данных (82%). Воспроизводимость радиомических параметров между исследованиями низкая из-за большого разнообразия используемых методик получения и постобработки изображений, а также извлечения и статистической обработки радиомических параметров.

Заключение. Обсуждается необходимость выделения базового блока устойчивых радиомических параметров для внедрения метода в клиническую практику, что возможно сделать только при стандартизации методов радиомики и создания открытой базы радиомических данных.

Ключевые слова: радиомика; злокачественные образования головы и шеи; радиомические параметры.

Как цитировать:

Васильев Ю.А., Нанова О.Г., Блохин И.А., Решетников Р.В., Владзимирский А.В., Омелянская О.В. Приоритетные параметры радиомического анализа для компьютерной томографии при злокачественных новообразованиях головы и шеи: систематический обзор // Digital Diagnostics. 2024. Т. 5, № 2. С. 255–268. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD623240>

Рукопись получена: 13.11.2023

Рукопись одобрена: 04.12.2023

Опубликована online: 29.01.2024

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD623240>

Priority radiomic parameters for computed tomography of head and neck malignancies: A systematic review

Yuriy A. Vasilev, Olga G. Nanova, Ivan A. Blokhin, Roman V. Reshetnikov, Anton V. Vladzimirskyy, Olga V. Omelyanskaya

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

ABSTRACT

BACKGROUND: Radiomics is the newest and most promising direction in modern radiographic diagnostics. The number of head and neck cancer studies employing radiomics is increasing annually. A systematic review of recent publications (2021–2023) on computed tomography (CT) of head and neck malignancies was performed.

AIM: To present systematized data on parameters for radiomic analysis for head and neck malignancies identified by CT data.

MATERIALS AND METHODS: The literature search was carried out in PubMed. The basic characteristics of the selected articles were extracted, and their quality was assessed using RQS 2.0 and the modified QUADAS-CAD questionnaire. The reproducibility level of radiomic parameters selected for predictive models in different studies was assessed. Eleven articles were selected for the review. In most cases, a high risk of systematic error associated with data imbalance in terms of demographic parameters and level of pathologies was noted.

RESULTS: The range of RQS 2.0 scores for the included articles varied from 19.44% to 50.00% of the maximum possible score. The decreasing research quality was mainly caused by the lack of external result validation (73% of the analyzed articles) and data accessibility and transparency (82%). Inter-study reproducibility of radiomic parameters was low owing to the wide variety of techniques used for image acquisition, image post-processing, extraction, and statistical processing of radiomic parameters.

CONCLUSION: A set of stable radiomic parameters must be successfully introduced into clinical practice. The standardization of radiomics method and creation of an open radiomics database are necessary for this purpose.

Keywords: radiomics; head and neck cancer; radiomic parameters.

To cite this article:

Vasilev YuA, Nanova OG, Blokhin IA, Reshetnikov RV, Vladzimirskyy AV, Omelyanskaya OV. Priority radiomic parameters for computed tomography of head and neck malignancies: A systematic review. *Digital Diagnostics*. 2024;5(2):255–268. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD623240>

Submitted: 13.11.2023

Accepted: 04.12.2023

Published online: 29.01.2024

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD623240>

头颈部恶性肿瘤计算机断层扫描的优先放射组学分析参数：系统综述

Yuriy A. Vasilev, Olga G. Nanova, Ivan A. Blokhin, Roman V. Reshetnikov, Anton V. Vladzemyrskyy, Olga V. Omelyanskaya

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

摘要

论证。放射组学是现代放射治疗诊断中最新、最有前途的领域。使用这种方法对头颈部恶性肿瘤进行检查的数量每年都在增加。我们对基于计算机断层扫描的头颈部恶性肿瘤最新出版物（2021–2023 年）进行了系统综述。

目的是系统整理通过计算机断层扫描检测到的头颈部癌症的放射组学分析参数数据。

材料和方法。这些文章在 PubMed 数据库中进行了检索。我们提取了所选文章的基线特征，并使用 RQS 2.0 和修改后的 QUADAS-CAD 问卷对其质量进行了评估。我们评估了不同研究中预后模型所选放射组学参数的可重复性水平。我们选择了 11 篇文章进行审查。在大多数情况下，由于人口统计参数和病理学水平的取样不平衡，系统误差的风险很高。

结果。在评估放射组学的质量时，所分析文章的得分范围从最高可能得分的 19.44% 到 50.00% 不等。导致研究质量下降的主要问题是研究结果缺乏外部验证（占所分析文章的 73%），以及研究数据无法获取或缺乏透明度（占 82%）。由于所使用的图像采集和后处理技术种类繁多，以及对放射组学参数的提取和统计处理，不同研究之间放射组学参数的可重复性很低。

结论。讨论将该方法引入临床实践的基本稳定放射组学参数分配的必要性，这只有在放射组学方法标准化和建立开放的放射组学数据库的情况下才能实现。

关键词：放射组学；头颈部恶性肿瘤；放射组学参数。

引用本文：

Vasilev YuA, Nanova OG, Blokhin IA, Reshetnikov RV, Vladzemyrskyy AV, Omelyanskaya OV. 头颈部恶性肿瘤计算机断层扫描的优先放射组学分析参数：系统综述. *Digital Diagnostics*. 2024;5(2):255–268. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD623240>

收到: 13.11.2023

接受: 04.12.2023

发布日期: 29.01.2024

ОБОСНОВАНИЕ

Радиомика — новейшее направление современной медицины. Основная задача метода — повышение качества диагностики на основе параметров медицинских изображений, невидимых человеческому глазу: радиомических признаков [1]. Радиомический анализ в лучевой диагностике стремительно развивается [2]. Перспектива метода — широкое использование как вспомогательного инструмента для прогнозирования и принятия решений по тактике лечения.

На сегодняшний момент имеются несколько тысяч радиомических параметров [3], относящихся к трём основным группам:

- характеристики кривой, описывающие свойства изображения;
- текстурные параметры, то есть gray-scale матрицы, характеризующие соотношения пикселей;
- параметры формы.

В каждой из групп радиомических признаков выделяют несколько подгрупп.

Количество параметров, использованных в исследованиях, варьирует от нескольких десятков до нескольких тысяч и зависит от способа выделения радиомических признаков: вручную или благодаря алгоритмам машинного обучения [3, 4]. Распределение по основным группам определённых параметров также максимально разнообразно: могут быть включены все группы признаков в разных пропорциях, либо, например, включены только текстурные признаки и не включены параметры формы. Выбор числа радиомических признаков и их состава при ручной обработке («handcrafted features») в настоящий момент зависит в основном от выбранного приложения для анализа и интуиции исследователя.

Перспектива внедрения радиомики как вспомогательного диагностического инструмента во врачебную практику ставит вопрос об унифицировании набора радиомических признаков [5, 6]. Отобранные для широкого практического использования признаки должны быть воспроизводимы между разными исследованиями. Однако имеется целый ряд факторов, различающих эти исследования: анализируемые структуры, тип прогноза, способ получения и обработки изображений, статистические методы анализа радиомических признаков.

ЦЕЛЬ

Цель настоящего исследования — систематизация данных по используемым параметрам радиомического анализа при раке головы и шеи, выявленным по данным компьютерной томографии (КТ). Рак шеи и головы, включающий новообразования в области горла, гортани, носа, пазух и рта [7], был выбран как один из самых распространённых видов рака [8], требующий мультимодальной диагностики, начиная с КТ [9–11].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Поисковая стратегия

Поиск осуществлялся в базе PubMed. Поисковый запрос ограничивался английским языком. Даты поиска выбраны таким образом, чтобы списки литературы в большинстве своём не перекрывались между нашим и другими исследованиями: с 15 ноября 2020 года по 1 июня 2023 года [12–14].

Поисковый запрос выглядел следующим образом:

«head and neck neoplasms»[MeSH Terms] AND («artificial intelligence»[MeSH Terms] OR («artificial»[All Fields] AND «intelligence»[All Fields]) OR «artificial intelligence»[All Fields] OR («deep learning»[MeSH Terms] OR («deep»[All Fields] AND «learning»[All Fields]) OR «deep learning»[All Fields]) OR («machine learning»[MeSH Terms] OR («machine»[All Fields] AND «learning»[All Fields]) OR «machine learning»[All Fields]) OR («neural networks, computer»[MeSH Terms] OR («neural»[All Fields] AND «networks»[All Fields] AND «computer»[All Fields]) OR «computer neural networks»[All Fields] OR («neural»[All Fields] AND «network»[All Fields]) OR «neural network»[All Fields]) OR «radiomic*»[All Fields] OR «radiomic features*»[All Fields] OR «radiomics features*»[All Fields] AND («node*»[All Fields] OR «lymph node*»[All Fields] OR («nodal»[All Fields] OR «nodally»[All Fields] OR «nodals»[All Fields]) OR «metastas*»[All Fields]).

Критерии включения: оригинальные исследовательские статьи.

Критерии исключения: обзоры, метаанализы, а также клинические случаи, в которых исследовали опухоли шеи и головы радиомическими методами.

Дизайн исследования соответствует методическим рекомендациям PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses) [15].

Названия и абстракты найденных по поисковому запросу статей были независимо проанализированы двумя экспертами. В результате был отобран ряд статей для полнотекстового анализа. В случае расхождений относительно включения статьи в анализ привлекался третий эксперт, принимавший финальное решение. Дополнительный анализ списков литературы включённых работ для выявления публикаций, подходящих для настоящего исследования («snowballing»), не проводился.

Извлечение информации и оценка качества статьи

Из полных текстов отобранных статей извлекали следующую информацию:

- имя первого автора и имя ответственного автора;
- название статьи, год выхода, DOI;
- название журнала, импакт-фактор;
- страна, где выполнили исследование;
- задачи исследования;
- дизайн (проспективное/ретроспективное, одноцентровое/многоцентровое);

- критерии включения/исключения пациентов;
- число пациентов, их пол и возраст;
- локализация опухоли и её тип;
- общее число извлечённых радиомических признаков;
- распределение радиомических признаков по классам (оценивалось или нет); если оценивалось, то рассматривали следующие классы:
 - параметры формы (2D и 3D);
 - параметры первого типа;
 - параметры второго типа: текстурные параметры с несколькими подгруппами (Gray Level Co-occurrence Matrix, GLCM; Gray Level Run Length Matrix, GLRLM; Gray Level Size Zone Matrix, GLSZM; Neighbouring Gray Tone Difference Matrix, NGTDM; Gray Level Dependence Matrix, GLDM);
- способ анализа радиомических признаков:
 - использовали машинное обучение или нет;
 - в случае «handcrafted radiomics» — использованные статистические методы для отбора радиомических признаков;
- число отобранных авторами радиомических признаков в качестве имеющих предсказательную силу, а также их значимость.

Качество отобранных статей оценено двумя способами: по специализированной для радиомических исследований системе RQS 2.0 (Radiomics Quality Score 2.0) [16] и по универсальной для медицинских исследований системе QUADAS-2 (Quality Assessment of Diagnostic Accuracy Studies 2) [17, 18], модифицированной под задачи искусственного интеллекта — QUADAS-CAD

Анализ радиомических признаков

Из каждой отобранной статьи были извлечены радиомические признаки, определённые авторами как значимые для прогноза. Рассматривались признаки, полученные и на оригинальных изображениях, и на прошедших постпроцессинг. Учитывались признаки, отобранные разными статистическими методами: машинное обучение, регрессионный анализ, дисперсионный анализ, ресэмплинг (resampling), оценка по внутриклассовому коэффициенту корреляции. Если в исследовании тестировали несколько разных гипотез, то осуществлялось извлечение радиомических признаков, приведённых для каждой гипотезы отдельно. В двух исследованиях авторы для всех извлечённых радиомических параметров приводят в открытом доступе статистики, характеризующие устойчивость этих параметров — внутриклассовый коэффициент корреляции [19] и p -level для дисперсионного анализа [20], при этом не проводя редукцию числа параметров. В этих случаях мы, основываясь на приведённых открытых данных, самостоятельно отбирали наиболее устойчивые радиомические параметры для нашего анализа.

Оценивали степень перекрытия наборов значимых радиомических признаков как между исследованиями, так и внутри одного исследования для разных конечных точек.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Поиск литературы и отбор работ

По начальному поисковому запросу было получено 804 ссылки, у этих ссылок проанализировали названия и абстракты. В результате 762 ссылки были исключены как неподходящие (рассмотрены другие типы рака, не использовался радиомический анализ). По результатам анализа названия и абстракта включены 42 публикации (рис. 1). Из них в итоговый анализ было включено 11 статей, а 31 статья была исключена (11 статей использовали магнитно-резонансную томографию, 2 — ультразвуковое исследование; 7 исследовали рак щитовидной железы, 1 — рак пищевода; в 10 работах авторы не приводили используемые радиомические параметры).

Базовые характеристики статей

Приложение 1 суммирует базовые характеристики отобранных для обзора статей. Из 11 статей 5 выполнены в Китае [19, 21–24], 3 — в Европе (из них одна — в Италии) [25], и по одной статье — в Португалии/Австрии/Германии [26], Нидерландах [27], США [28], Канаде [20] и Тайланде [29]. Самые высокорейтинговые публикации были в журналах *Cancers* (импакт-фактор 6.575) [20] и *European Radiology* (импакт-фактор 6.020) [21]. Все исследования — ретроспективные. Восемь из включённых исследований — одноцентровые [20–23, 25, 27–29], три — многоцентровые [19, 24, 26].

Радиомические признаки использовали для прогноза общей выживаемости [25, 26, 29], выживаемости без прогрессирования [25, 29], выживаемости без отдалённых метастазов [28], риска локорегиональных рецидивов [25, 26, 28], оценки появления отдалённых метастазов [26], предоперационного прогнозирования метастазов в лимфатических узлах [21, 23, 24], классификации увеличенных шейных узлов [22]. В одной работе исследовали влияние устойчивости радиомических параметров на качество радиомических моделей [18]. Различия в свойствах радиомических признаков в зависимости от расположения опухоли исследовали в одной статье [20]. Валидацию ранее построенной модели на других данных проводили в одной работе [27].

Качество включённых работ по шкале RQS 2.0

Приложение 2 суммирует оценку качества статей по специализированной системе для радиомического анализа RQS 2.0 [4]. Диапазон баллов для исследованных статей изменяется от 7 (19,44%) [20] до 18 (50,00%) [22] из возможных 36 (100%) баллов, при среднем значении и стандартном отклонении 10 и 4 соответственно.



Рис. 1. Блок-схема систематического поиска литературы. МРТ — магнитно-резонансная томография, УЗИ — ультразвуковая диагностика

В 7 из 11 случаев (64%) процесс получения изображений был хорошо запрототолирован [21–26, 28]. Пять работ (45%) учитывали влияние сегментации (повторная сегментация двумя исследователями, алгоритмы сегментации, внесение случайного шума) на извлечение радиомических признаков [22, 23, 25, 29, 30]. Х. Teng и соавт. [20] оценивали надёжность радиомических признаков при мультицентровом характере исследований, а также влияние разных признаков на надёжность моделей в целом. Ни в одной из рассматриваемых работ не проводили анализа устойчивости радиомических признаков к временным вариациям (например, движению органов, увеличению/уменьшению размеров органов). Проблема переобучения моделей и редукция числа радиомических признаков в моделях с выбором наиболее значимых рассматривалась в 10 статьях (91%) [19, 21–29]. Построение моделей на объединённых наборах радиомических и клинических признаков, сопоставление смешанных, радиомических и клинических моделей проводили в 8 работах (73%) [22, 24–30]. Во всех исследованиях (100%) приводятся значения достоверности и качества дискриминации (AUC, p-value, в том числе полученные при ресэмплировании данных) [31]. Достаточно низкие показатели найдены для валидации полученных радиомических моделей. Так, валидацию использовали всего в 3 статьях (27%) [20, 23, 26], из них только в одной работе (9%) использовали валидацию с привлечением данных из другого центра [26].

Кроме того, низкие показатели в плане прозрачности данных: только в двух статьях данные находятся в открытом доступе — сами изображения [25] и извлечённые радиомические признаки [18].

Качество включённых работ по шкале QUADAS-CAD

Табл. 1 и табл. 2 суммируют оценку риска систематической ошибки, данную по QUADAS-CAD [17]. Общий риск систематической ошибки высок в 6 из 11 проанализированных статей (54,5%) [19, 20, 25, 26, 28, 29]. В 5 из 11 статей (45,5%) риск систематической ошибки низкий [21–24, 27]. Риск систематической ошибки из-за несбалансированности данных высокий в 7 исследованиях (64%) [19, 20, 23, 25, 26, 28, 29] и низкий в 4 (36%) [21, 22, 24, 27]. В большинстве случаев этот риск связан с несбалансированностью выборки по демографическим параметрам и характеру патологий. Машинное обучение использовали в шести статьях [19, 20, 22, 24, 26, 28], соответственно, часть вопросов блока D2 имеет отношение только к ним. Вероятность систематической ошибки вследствие выбранного способа использования и интерпретации индексных тестов была высокой в 4 исследованиях (36%) [19, 20, 26, 29], умеренной в 1 случае (9,5%) [28] и низкой в 6 работах (54,5%) [21–25, 27]. В большинстве случаев (64%) риск ошибки, связанный с оценкой референсных стандартов, был низким [19, 21–24, 27, 29].

Таблица 1. Опросник по QUADAS-CAD

Домен	Вопросы	Franzese C., 2023	Gonçalves M., 2022	Zhao X., 2023	Teng X., 2022	Zhang W., 2022	Yang G., 2022	Intarak S., 2022	Morgan H., 2021	Li J., 2021	Liu X., 2021	Zhai T., 2021	
D1	Были ли данные (обучающие и тестовые наборы) сбалансированы по тяжести (включая отсутствие) целевой патологии? Были ли данные (обучающие и тестовые наборы) сбалансированы с точки зрения демографических факторов?	нет	нет	да	неясно	да	да	нет	нет	да	нет	да	
		нет	нет	да	неясно	да	нет	нет	неясно	да	нет	да	
		да	нет	да	неясно	да	да	неясно	неясно	да	неясно	да	да
		–	да	–	неясно	да	–	–	да	да	да	неясно	–
D2	Если использовалась нейронная сеть, были ли наборы данных обучения и тестирования не пересекающимися или похожими? Если использовалась нейронная сеть, был ли рационален размер каждого набора данных?	–	нет	–	да	да	–	–	да	да	да	–	
		да	–	да	–	да	да	да	неясно	да	неясно	да	
		–	–	–	–	–	–	–	неясно	–	–	–	–
D3	Может ли референсный стандарт правильно классифицировать целевое состояние? Были ли результаты референсных стандартов подготовлены или проверены с необходимым уровнем экспертизы?	неясно	неясно	да	да	да	да	да	неясно	да	да	да	
		неясно	неясно	да	да	неясно	да	да	неясно	да	неясно	да	
D4	Была ли прозрачность в том, как были получены результаты? Все ли данные пациентов имели один и тот же референсный стандарт?	неясно	да	да	да	да	да	да	нет	да	да	да	
		неясно	да	да	да	неясно	да	да	нет	да	да	нет	да

Таблица 2. Оценка риска смещения по QUADAS-CAD

Первый автор, год	D1	D2	D3	D4	Общая оценка	Вес (%)
Franzese C., 2023	высокий	низкий	некоторые сомнения	высокий	высокий	2
Gonçalves M., 2022	высокий	высокий	некоторые сомнения	низкий	высокий	4
Zhao X., 2023	низкий	низкий	низкий	низкий	низкий	10
Teng X., 2022	высокий	высокий	низкий	низкий	высокий	32
Zhang W., 2022	низкий	низкий	низкий	низкий	низкий	6
Yang G., 2022	высокий	низкий	низкий	низкий	низкий	4
Intarak S., 2022	высокий	высокий	низкий	низкий	высокий	4
Morgan H., 2021	высокий	некоторые сомнения	высокий	высокий	высокий	1
Li J., 2021	низкий	низкий	низкий	низкий	низкий	15
Liu X., 2021	высокий	высокий	некоторые сомнения	высокий	высокий	14
Zhai T., 2021	низкий	низкий	низкий	низкий	низкий	6

В некоторых случаях был не ясен уровень компетенций врачей, оценивающих референсные значения; в связи с этим риск систематической ошибки был оценён как высокий (27%) [28] или умеренный (9%) [20, 25, 26]. Высокая вероятность систематических ошибок вследствие гетерогенности данных была обнаружена в 3 исследованиях (27%) [20, 25, 28], а низкая — в 8 исследованиях (73%) [19, 21–24, 26, 27, 29]. Причина неоднозначности оценок в некоторых случаях обусловлена низким уровнем детализации при описании путей анализа данных.

Использованные методы в статьях

Число извлечённых радиомических признаков варьирует от 36 [20] до 5486 [19]. Подробная информация о распределении извлечённых радиомических признаков по классам приводится в 5 статьях [22, 23, 25, 26, 28].

Машинное обучение для радиомического анализа использовали в 6 исследованиях [19, 20, 22, 24, 26, 28]. В остальных 5 работах для оценки значимости радиомических признаков в прогнозах использовали регрессионный анализ [25, 29], дисперсионный анализ (ANOVA) [23], внутриклассовый коэффициент корреляции (ICC) [29], ресэмплирование данных [28], одномерные тесты для попарного сравнения признаков (t-test, Mann–Whitney U test, chi-square test, Fisher exact test) [21, 23, 27].

Число отобранных признаков в статьях варьирует от 2 [25, 27] до 19 [26]. В двух статьях авторы не производят отбор наиболее значимых признаков, а приводят соответствующие статистики для каждого из извлечённых

признаков в приложении — ICC [19] и процент повторов признаков в репликах [28].

Анализ воспроизводимости признаков

Всего в 11 исследованиях в качестве валидных для прогностических моделей отобран 191 радиомический признак (см. Приложение 1), среди которых к признакам первого порядка относятся 47. Из них в пяти случаях (11%) один и тот же признак встречается в двух разных исследованиях, в остальных случаях признаки между исследованиями не повторяются. К характеристикам формы относятся 25 радиомических признаков. Из них в пяти случаях (20%) один и тот же признак встречается в двух разных исследованиях. В двух случаях (8%) один и тот же признак встречается в трёх разных исследованиях. В остальных случаях признаки между исследованиями не повторяются. К признакам второго порядка относятся 119 радиомических признаков. Из них в одном (0,8%) случае один и тот же признак встречается в двух разных исследованиях.

В двух статьях радиомические признаки практически полностью воспроизводятся для разных моделей [23, 29]. Ещё в двух исследованиях радиомические признаки не воспроизводятся между разными моделями [25, 28].

ОБСУЖДЕНИЕ

В статье суммированы работы по радиомическому анализу злокачественных новообразований головы

и шеи при КТ за 2021–2023 гг. с фокусом на формировании списка часто используемых и надёжных радиомических параметров. В проанализированной литературе наблюдается большое разнообразие использованных подходов: начиная от способов получения изображений и их постобработки, до привлекаемых программ для извлечения радиомических параметров и статистических методов их обработки. Кроме того, при построении прогностических радиомических моделей всегда проводится редукция числа радиомических параметров. Отбор параметров осуществляется самыми разными методами — от одномерных статистических тестов до машинного обучения — и определяется исключительно предпочтениями авторов. Выбранные статистические методы редукции числа признаков также существенно влияют на результат отбора параметров. Одна из основных проблем современной радиомики — сложность генерализации и внедрения в практику успехов отдельных исследований — не решена до настоящего момента, что подчёркивают результаты последнего метаанализа метаанализов [30].

Качество исследований

Анализ в сравнительном аспекте предыдущих систематических обзоров радиомических исследований злокачественных образований головы и шеи [13, 32] и нашего нового исследования обнаруживает ряд методологических проблем, сохраняющихся в течение десятилетия.

Одна из основных проблемных точек радиомических исследований — отсутствие валидации полученных радиомических моделей на внешних данных. В проанализированном нами наборе статей только в одном случае проводили валидацию с привлечением данных из другого центра [33].

Другая ключевая проблема — это непрозрачность данных и недостаточно полное описание методик анализа, что препятствует воспроизведению полученных в таких работах результатов. Хотя не секрет, что воспроизводимость результата — один из базовых критериев научного подхода, а также основа для внедрения метода в практику [34].

Наши выводы согласуются с оценками, данными в других систематических обзорах. Так, во всех четырёх найденных нами обзорах исследований злокачественных образований головы и шеи [12, 13, 32, 35] отмечается недостаток валидации результатов на внешних данных. С. Giannitto и соавт. [13] отмечают также непрозрачность использованных в исследованиях методик, обусловленную недостаточно подробным описанием хода исследования, и отсутствие оценок потенциала внедрения результатов в клиническую практику. А. Guha и соавт. [12] отмечают высокую гетерогенность в методиках, что затрудняет обобщение результатов исследований.

В настоящий момент активно развивается инициатива по стандартизации биомаркёров лучевой диагностики IBSI [36]. С учётом детальности проработки проблемы и числа

участников сообщества, данная инициатива может стать прекрасным шагом на пути к решению проблемы непрочности радиомического анализа. Тщательное планирование клинических испытаний алгоритмов на основе интеллектуальных технологий также может повысить воспроизводимость и надёжность результатов [37].

Создание открытого пространства для радиомических исследований позволит размещать там и отрицательные результаты, которые, как правило, не публикуются в рецензируемых источниках из-за так называемой «положительной систематической ошибки» [38]. Это крайне важно для минимизации систематических ошибок при оценке эффективности радиомического подхода. Дополнительно, благодаря мета-исследованию В. Коса и соавт. [39], можно выделить проблемы преобладания ретроспективного дизайна исследований (95%, 142 из 149) и отсутствия референс-теста в значительной части работ (44%, 66 из 149) [39].

Основной частью рассматриваемого метода являются радиомические параметры, описывающие взаимоотношения между вокселями, 2D- и 3D-характеристики образований и другие их свойства. На текущий момент известно несколько тысяч таких параметров, однако консенсус по диагностической ценности как каждого из них, так и различных их сочетаний не достигнут. В проанализированных статьях наблюдается большой разброс в числе выбранных признаков — от единиц до тысяч. Подробно группы признаков, отражающие разные свойства новообразований, описываются в менее чем половине исследований. А в трёх статьях авторы вообще не заостряют внимание на том, какие именно радиомические параметры попали в модели. Устойчивость радиомических параметров в многоцентровых исследованиях оценивали только в одной работе из проанализированных.

Для возможности внедрения прогностических радиомических моделей в широкую клиническую практику назрела необходимость выделения блока приоритетных параметров, основанных на оценке их устойчивости и воспроизводимости. Нами была сделана попытка выбрать наиболее часто встречающиеся в прогностических моделях радиомические параметры. Результаты показали, что воспроизводимость радиомических параметров крайне низка, что происходит из-за большого разнообразия используемых методик. Это согласуется с предположениями предыдущих исследователей о том, что радиомические параметры могут быть случайны и не воспроизводимы [40]. Рекомендовать какой-то блок радиомических параметров для практического использования в настоящий момент нельзя. Прежде всего должна быть проведена унификация радиомических методик и приняты рекомендуемые стандарты, после чего возможно будет выделение базового блока радиомических параметров с целью внедрения радиомического анализа медицинскую визуализацию [41]. Унификация радиомического анализа также зависит от работ в области стандартизации протоколов исследований и контроля постобработки [42].

Ограничения нашего подхода

Наша работа имеет ряд ограничений, характерных для систематических обзоров. Поскольку нашей задачей было обеспечить максимально широкий обзор существующих на данный момент исследований злокачественных новообразований головы и шеи, в обзор включены исследования и первичных, и вторичных новообразований, а также разных в гистологическом плане опухолей головы и шеи.

Поиск ограничивался базой PubMed и англоязычными работами, что, вероятно, несколько уменьшило число обнаруженных нами исследований.

Во всех исследованиях наблюдалась несбалансированность данных. Были включены только случаи патологий и не были включены непатологические случаи. Кроме того, наблюдается несбалансированность данных по демографическим параметрам.

Всё это позволило провести нам только качественный синтез с использованием описательной статистики, а не полноценный метаанализ. Тем не менее наше исследование выявило основные проблемные точки в современной радиомике и дальнейшее направление исследований в этой области.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Радиомика — динамично развивающаяся современная область. Наблюдается нарастающее число исследований с применением радиомических подходов. Мы обнаружили, что основные проблемы в этой области, препятствующие внедрению этого многообещающего метода в клиническую практику, — это низкая прозрачность исследований, отсутствие открытых баз данных и отсутствие унифицированных подходов к радиомическим исследованиям. Основным направлением в развитии радиомики должно быть создание общепринятых стандартов в получении изображений, их обработке и стратегиях моделирования. Важно при проведении исследований использовать инструменты для оценки рисков систематической ошибки, например, QUADAS-2 или его модифицированные для определённых задач варианты, и учитывать рекомендации по снижению этих рисков. Необходимо также, чтобы радиомические данные были общедоступны, как это принято, например, для генетических исследований. Создание блока устойчивых радиомических параметров — необходимое условие для внедрения метода в клиническую практику. Платформа IBSI является хорошим решением для стандартизации и публикации в открытом доступе радиомических данных.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Приложение 1 «Базовые характеристики статей»
DOI: <https://doi.org/10.17816/DD623240-4214843>

Приложение 2 «Оценка качества радиомики по RQS-2.0»
DOI: <https://doi.org/10.17816/DD623240-4214842>

Источник финансирования. Данная статья подготовлена авторским коллективом в рамках научно-исследовательской работы «Научное обоснование методов лучевой диагностики опухолевых заболеваний с использованием радиомического анализа» (№ в Единой государственной информационной системе учёта: № 123031500005-2) в соответствии с Приказом от 21.12.2022 № 1196 «Об утверждении государственных заданий, финансовое обеспечение которых осуществляется за счет средств бюджета города Москвы государственным бюджетным (автономным) учреждениям подведомственным Департаменту здравоохранения города Москвы, на 2023 год и плановый период 2024 и 2025 годов» Департамента здравоохранения города Москвы.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов.

Вклад авторов. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распределён следующим образом: Ю.А. Васильев, А.В. Владзимирский, О.В. Омелянская — концепция исследования, согласование финальной версии рукописи; Р.В. Решетников, И.А. Блохин, О.Г. Нанова — обзор литературы, анализ данных, написание текста статьи.

ADDITIONAL INFORMATION

Additional materials.

Supplement 1. Basic characteristics of articles.

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD623240-4214843>

Supplement 2. Radiomics quality assessment according to RQS-2.0.

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD623240-4214842>

Funding source. This paper was prepared by a group of authors as a part of the research and development effort titled “Scientific evidence for using radiomics-guided medical imaging to diagnose cancer”, No. 123031400009-1” (USIS No. 123031500005-2), in accordance with the Order No. 1196 dated December 21, 2022 “On approval of state assignments funded by means of allocations from the budget of the city of Moscow to the state budgetary (autonomous) institutions subordinate to the Moscow Health Care Department, for 2023 and the planned period of 2024 and 2025” issued by the Moscow Health Care Department.

Competing interests. The authors declare no competing interests.

Authors' contribution. All authors confirm that their authorship meets the international ICMJE criteria (all authors made a significant contribution to the development of the concept, conduct of the study and preparation of the article, read and approved the final version before publication. The contribution is distributed as follows: Yu.A. Vasilev, A.V. Vladzimirsky, O.V. Omelyanskaya — study concept, approval of the final version of the manuscript; R.V. Reshetnikov, I.A. Blokhin, O.G. Nanova — literature review, data analysis, writing the text of the article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rizzo S., Botta F., Raimondi S., et al. Radiomics: the facts and the challenges of image analysis // *Eur Radiol Exp*. 2018. Vol. 2. doi: 10.1186/s41747-018-0068-z
2. Lambin P., Leijenaar R., Deist T., et al. Radiomics: the bridge between medical imaging and personalized medicine // *Nat Rev Clin Oncol*. 2017. Vol. 14. P. 749–762. doi: 10.1038/nrclinonc.2017.141
3. Mayerhoefer M.E., Materka A., Langs G., et al. Introduction to Radiomics // *J Nucl Med*. 2020. Vol. 61, N 4. P. 488–495. doi: 10.2967/jnumed.118.222893
4. Wan Y., Yang P., Xu L., et al. Radiomics analysis combining unsupervised learning and handcrafted features: A multiple-disease study // *Medical Physics*. 2021. Vol. 48, N 11. P. 7003–7015. doi: 10.1002/mp.15199
5. Zwanenburg A., Vallières M., Abdalah M.A., et al. The Image Biomarker Standardization Initiative: Standardized Quantitative Radiomics for High-Throughput Image-based Phenotyping // *Radiology*. 2020. Vol. 295, N 2. doi: 10.1148/radiol.2020191145
6. Berenguer R., Pastor-Juan M., Canales-Vázquez J., et al. Radiomics of CT Features May Be Nonreproducible and Redundant: Influence of CT Acquisition Parameters // *Radiology*. 2018. Vol. 288, N 2. doi: 10.1148/radiol.2018172361
7. Laura Q.M., Chow M.D. Head and Neck Cancer // *N Engl J Med*. 2020. Vol. 382. P. 60–72. doi: 10.1056/NEJMra1715715
8. Sung H., Ferlay J., Siegel R.L., et al. Global Cancer Statistics 2020: GLOBOCAN Estimates of Incidence and Mortality Worldwide for 36 Cancers in 185 Countries // *Ca Cancer J Clin*. 2021. Vol. 71, N 3. P. 209–249. doi: 10.3322/caac.21660
9. Болотина Л.В., Владимирова Л.Ю., Деньгина Н.В., Новик А.В., Романов И.С. Практические рекомендации по лечению злокачественных опухолей головы и шеи // *Злокачественные опухоли*. 2020. Т. 10, № 3s2-1. С. 93–108. doi: 10.18027/2224-5057-2020-10-3s2-06
10. Bossi P., Chan A.T., Licita L., et al. Nasopharyngeal carcinoma: ESMO-EURACAN Clinical Practice Guidelines for diagnosis, treatment and follow-up // *Annals of oncology*. 2021. Vol. 32, N 4. P. 452–465. doi: 10.1016/j.annonc.2020.12.007
11. Петровичев В.С., Неклюдова М.В., Сеницын В.Е., Никитин И.Г. Двухэнергетическая компьютерная томография рака головы и шеи // *Digital Diagnostics*. 2021. Т. 2, № 3. С. 343–355. doi: 10.17816/DD62572
12. Guha A., Connor S., Anjari M., et al. Radiomic analysis for response assessment in advanced head and neck cancers, a distant dream or an inevitable reality? A systematic review of the current level of evidence // *BJR*. 2019. Vol. 93, N 1106. doi: 10.1259/bjr.20190496
13. Giannitto C., Mercante G., Ammirabile A., et al. Radiomics-based machine learning for the diagnosis of lymph node metastases in patients with head and neck cancer: Systematic review // *Head & Neck*. 2022. Vol. 45, N 2. P. 482–491. doi: 10.1002/hed.27239
14. Yu Y., Li X., Li W., Wang H., Wang Y. Pretreatment radiomics power in evaluating neoadjuvant chemotherapy response and outcome for patients with head and neck squamous cell carcinoma: a systematic review and meta-analysis. Preprint. 2023. doi: 10.21203/rs.3.rs-2530190/v1
15. Page M.J., McKenzie J.E., Bossuyt P.M., et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews // *BMJ*. 2021. Vol. 372. doi: 10.1136/bmj.n71
16. Radiomics Quality Score — RQS 2.0. [Internet]. [дата обращения 01.01.2023]. Доступ по ссылке: <https://www.radiomics.world/rqs2>
17. Kodenko M.R., Vasilev Y.A., Vladzimirsky A.V., et al. Diagnostic Accuracy of AI for Opportunistic Screening of Abdominal Aortic Aneurysm in CT: A Systematic Review and Narrative Synthesis // *Diagnostics*. 2022. Vol. 12, N 12. P. 3197. doi: 10.3390/diagnostics12123197
18. Коденко М.Р., Решетников Р.В., Макарова Т.А. Инструмент оценки качества исследований диагностической точности алгоритмов искусственного интеллекта (QUADAS-CAD) // *Digital Diagnostics*. 2022. Т. 3, № S1. С. 4–5. doi: 10.17816/DD105567
19. Teng X., Zhang J., Ma Z., et al. Improving radiomic model reliability using robust features from perturbations for head-and-neck carcinoma // *Front. Oncol*. 2022. Vol. 12. doi: 10.3389/fonc.2022.974467
20. Liu X., Maleki F., Muthukrishnan N., et al. Site-Specific Variation in Radiomic Features of Head and Neck Squamous Cell Carcinoma and Its Impact on Machine Learning Models // *Cancers*. 2021. Vol. 13, N 15. doi: 10.3390/cancers13153723
21. Zhao X., Li W., Zhang J., et al. Radiomics analysis of CT imaging improves preoperative prediction of cervical lymph node metastasis in laryngeal squamous cell carcinoma // *European Radiology*. 2023. Vol. 33. P. 1121–1131. doi: 10.1007/s00330-022-09051-4
22. Zhang W., Peng J., Zhao S., et al. Deep learning combined with radiomics for the classification of enlarged cervical lymph nodes // *Journal of Cancer Research and Clinical Oncology*. 2022. Vol. 148. P. 2773–2780. doi: 10.1007/s00432-022-04047-5
23. Yang G., Yang F., Zhang F., et al. Radiomics Profiling Identifies the Value of CT Features for the Preoperative Evaluation of Lymph Node Metastasis in Papillary Thyroid Carcinoma // *Diagnostics*. 2022. Vol. 12, N 5. doi: 10.3390/diagnostics12051119
24. Li J., Wu X., Mao N., et al. Computed Tomography-Based Radiomics Model to Predict Central Cervical Lymph Node Metastases in Papillary Thyroid Carcinoma: A Multicenter Study // *Front. Endocrinol*. 2021. Vol. 12. doi: 10.3389/fendo.2021.741698
25. Franzese C., Lillo S., Cozzi L., et al. Predictive value of clinical and radiomic features for radiation therapy response in patients with lymph node-positive head and neck cancer // *Head & Neck*. 2023. Vol. 45, N 5. P. 1184–1193. doi: 10.1002/hed.27332
26. Gonçalves M., Gsaxner Ch., Ferreira A., et al. Radiomics in Head and Neck Cancer Outcome Predictions // *Diagnostics*. 2022. Vol. 12, N 11. doi: 10.3390/diagnostics12112733
27. Zhai T., Wesseling F., Langendijk J., et al. External validation of nodal failure prediction models including radiomics in head and neck cancer // *Oral Oncology*. 2021. Vol. 112. doi: 10.1016/j.oraloncology.2020.105083
28. Morgan H.E., Wang K., Dohopolski M., et al. Exploratory ensemble interpretable model for predicting local failure in head and neck cancer: the additive benefit of CT and intra-treatment cone-beam computed tomography features // *Quant Imaging Med Surg*. 2021. Vol. 11, N 12. P. 4781–4796. doi: 10.21037/qims-21-274
29. Intarak S., Chongpison Y., Vimolnoch M., et al. Tumor Prognostic Prediction of Nasopharyngeal Carcinoma Using CT-Based Radiomics in Non-Chinese Patients // *Front. Oncol*. 2022. Vol. 12. doi: 10.3389/fonc.2022.775248
30. Zhong J., Lu J., Zhang G., et al. An overview of meta-analyses on radiomics: more evidence is needed to support

clinical translation // *Insights Imaging*. 2023. Vol. 14. doi: 10.1186/s13244-023-01437-2

31. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022617324/ 19.04.2022. Морозов С.П., Андрейченко А.Е., Четвериков С.Ф., и др. Веб-инструмент для выполнения ROC анализа результатов диагностических тестов: № 2022616046.

32. Giraud P., Giraud Ph., Gasnier A., et al. Radiomics and Machine Learning for Radiotherapy in Head and Neck Cancers // *Front. Oncol*. 2019. Vol. 9. doi: 10.3389/fonc.2019.00174

33. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023619686/ 15.05.2023. Васильев Ю.А., Владзимирский А.В., Омелянская О.В., и др. Веб-инструмент для контроля качества датасетов: № 2023617136.

34. Gundersen O.E., Kjetsmo S. State of the Art: Reproducibility in Artificial Intelligence // *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*. 2018. Vol. 32, N 1. doi: 10.1609/aaai.v32i1.11503

35. Tortora M., Gemini L., Scaravilli A., et al. Radiomics Applications in Head and Neck Tumor Imaging: A Narrative Review // *Cancers*. 2023. Vol. 15, N 4. doi: 10.3390/cancers15041174

36. Image Biomarker Standardisation Initiative (IBSI) [Internet]. [дата обращения: 01.01.2023]. Доступ по ссылке: <https://theibsi.github.io/>

37. Морозов С.П., Владзимирский А.В., Кляшторный В.Г., и др. Клинические испытания программного обеспечения на

основе интеллектуальных технологий (лучевая диагностика). Москва, 2019.

38. Buvat I., Orhac F. The Dark Side of Radiomics: On the Paramount Importance of Publishing Negative Results // *The Journal of Nuclear Medicine*. 2019. Vol. 60, N 11. P. 1543–1544. doi: 10.2967/jnumed.119.235325

39. Kocak B., Bulut E., Bayrak O.N., et al. NEgative results in Radiomics research (NEVER): A meta-research study of publication bias in leading radiology journals // *European Journal of Radiology*. 2023. Vol. 163. doi: 10.1016/j.ejrad.2023.110830

40. Berenguer R., Pastor-Juan M.R., Canales-Vázquez J., et al. Radiomics of CT Features May Be Nonreproducible and Redundant: Influence of CT Acquisition Parameters // *Radiology*. 2018. Vol. 288, N 2. doi: 10.1148/radiol.2018172361

41. Морозов С.П., Линденбрaten Л.Д., Габай П.Г., и др. Основы менеджмента медицинской визуализации / под ред. С.П. Морозова. Москва : ГЭОТАР-Медиа, 2020. doi: 10.33029/9704-5247-9-MEN-2020-1-424

42. Хоружая А.Н., Ахмад Е.С., Семенов Д.С. Роль системы контроля качества лучевой диагностики онкологических заболеваний в радиомике // *Digital Diagnostics*. 2021. Т. 2, № 2. С. 170–184. doi: 10.17816/DD60393

REFERENCES

1. Rizzo S, Botta F, Raimondi S, et al. Radiomics: the facts and the challenges of image analysis. *Eur Radiol Exp*. 2018;2. doi: 10.1186/s41747-018-0068-z

2. Lambin P, Leijenaar R, Deist T, et al. Radiomics: the bridge between medical imaging and personalized medicine. *Nat Rev Clin Oncol*. 2017;14:749–762. doi: 10.1038/nrclinonc.2017.141

3. Mayerhoefer ME, Materka A, Langs G, et al. Introduction to Radiomics. *J Nucl Med*. 2020;61(4):488–495. doi: 10.2967/jnumed.118.222893

4. Wan Y, Yang P, Xu L, et al. Radiomics analysis combining unsupervised learning and handcrafted features: A multiple-disease study. *Medical Physics*. 2021;48(11):7003–7015. doi: 10.1002/mp.15199

5. Zwanenburg A, Vallières M, Abdalah MA, et al. The Image Biomarker Standardization Initiative: Standardized Quantitative Radiomics for High-Throughput Image-based Phenotyping. *Radiology*. 2020;295(2). doi: 10.1148/radiol.2020191145

6. Berenguer R, Pastor-Juan M, Canales-Vázquez J, et al. Radiomics of CT Features May Be Nonreproducible and Redundant: Influence of CT Acquisition Parameters. *Radiology*. 2018;288(2). doi: 10.1148/radiol.2018172361

7. Laura QM, Chow MD. Head and Neck Cancer. *N Engl J Med*. 2020;382:60–72. doi: 10.1056/NEJMr1715715

8. Sung H, Ferlay J, Siegel RL, et al. Global Cancer Statistics 2020: GLOBOCAN Estimates of Incidence and Mortality Worldwide for 36 Cancers in 185 Countries. *Ca Cancer J Clin*. 2021;71(3):209–249. doi: 10.3322/caac.21660

9. Bolotina LV, Vladimirova LYu, Den'gina NV, Novik AV, Romanov IS. Practice guidelines for the treatment of malignant tumors of the head and neck. *Zlokačestvennye opuholi*. 2020;10(3s2-1):93–108. (In Russ). doi: 10.18027/2224-5057-2020-10-3s2-06

10. Bossi P, Chan AT, Licitra L, et al. Nasopharyngeal carcinoma: ESMO-EURACAN Clinical Practice Guidelines for diagnosis,

treatment and follow-up. *Annals of oncology*. 2021;32(4):452–465. doi: 10.1016/j.annonc.2020.12.007

11. Petrovichev VS, Neklyudova MV, Sinitsyn VE, Nikitin IG. Dual-energy computed tomography for head and neck cancer. *Digital Diagnostics*. 2021;2(3):343–355. doi: 10.17816/DD62572

12. Guha A, Connor S, Anjari M, et al. Radiomic analysis for response assessment in advanced head and neck cancers, a distant dream or an inevitable reality? A systematic review of the current level of evidence. *BJR*. 2019;93(1106). doi: 10.1259/bjr.20190496

13. Giannitto C, Mercante G, Ammirabile A, et al. Radiomics-based machine learning for the diagnosis of lymph node metastases in patients with head and neck cancer: Systematic review. *Head & Neck*. 2022;45(2):482–491. doi: 10.1002/hed.27239

14. Yu Y, Li X, Li W, Wang H, Wang Y. Pretreatment radiomics power in evaluating neoadjuvant chemotherapy response and outcome for patients with head and neck squamous cell carcinoma: a systematic review and meta-analysis. Preprint. 2023. doi: 10.21203/rs.3.rs-2530190/v1

15. Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*. 2021;372. doi: 10.1136/bmj.n71

16. Radiomics Quality Score — RQS 2.0 [Internet]. [cited 1 Jan 2023]. Available from: <https://www.radiomics.world/rqs2>

17. Kodenko MR, Vasilev YA, Vladzimirskyy AV, et al. Diagnostic Accuracy of AI for Opportunistic Screening of Abdominal Aortic Aneurysm in CT: A Systematic Review and Narrative Synthesis. *Diagnostics*. 2022;12(12):3197. doi: 10.3390/diagnostics12123197

18. Kodenko MR, Reshetnikov RV, Makarova TA. Modification of quality assessment tool for artificial intelligence diagnostic test accuracy studies (QUADAS-CAD). *Digital Diagnostics*. 2022;3(S1):4–5. doi: 10.17816/DD105567

19. Teng X, Zhang J, Ma Z, et al. Improving radiomic model reliability using robust features from perturbations for head-and-neck carcinoma. *Front. Oncol.* 2022;12. doi: 10.3389/fonc.2022.974467
20. Liu X, Maleki F, Muthukrishnan N, et al. Site-Specific Variation in Radiomic Features of Head and Neck Squamous Cell Carcinoma and Its Impact on Machine Learning Models. *Cancers.* 2021;13(15). doi: 10.3390/cancers13153723
21. Zhao X, Li W, Zhang J, et al. Radiomics analysis of CT imaging improves preoperative prediction of cervical lymph node metastasis in laryngeal squamous cell carcinoma. *European Radiology.* 2023;33:1121–1131. doi: 10.1007/s00330-022-09051-4
22. Zhang W, Peng J, Zhao S, et al. Deep learning combined with radiomics for the classification of enlarged cervical lymph nodes. *Journal of Cancer Research and Clinical Oncology.* 2022;148:2773–2780. doi: 10.1007/s00432-022-04047-5
23. Yang G, Yang F, Zhang F, et al. Radiomics Profiling Identifies the Value of CT Features for the Preoperative Evaluation of Lymph Node Metastasis in Papillary Thyroid Carcinoma. *Diagnostics.* 2022;12(5). doi: 10.3390/diagnostics12051119
24. Li J, Wu X, Mao N, et al. Computed Tomography-Based Radiomics Model to Predict Central Cervical Lymph Node Metastases in Papillary Thyroid Carcinoma: A Multicenter Study. *Front. Endocrinol.* 2021;12. doi: 10.3389/fendo.2021.741698
25. Franzese C, Lillo S, Cozzi L, et al. Predictive value of clinical and radiomic features for radiation therapy response in patients with lymph node-positive head and neck cancer. *Head & Neck.* 2023;45(5):1184–1193. doi: 10.1002/hed.27332
26. Gonçalves M, Gsaxner Ch, Ferreira A, et al. Radiomics in Head and Neck Cancer Outcome Predictions. *Diagnostics.* 2022;12(11). doi: 10.3390/diagnostics12112733
27. Zhai T, Wesseling F, Langendijk J, et al. External validation of nodal failure prediction models including radiomics in head and neck cancer. *Oral Oncology.* 2021;112. doi: 10.1016/j.oraloncology.2020.105083
28. Morgan HE, Wang K, Dohopolski M, et al. Exploratory ensemble interpretable model for predicting local failure in head and neck cancer: the additive benefit of CT and intra-treatment cone-beam computed tomography features. *Quant Imaging Med Surg.* 2021;11(12):4781–4796. doi: 10.21037/qims-21-274
29. Intarak S, Chongpison Y, Vimolnoch M, et al. Tumor Prognostic Prediction of Nasopharyngeal Carcinoma Using CT-Based Radiomics in Non-Chinese Patients. *Front. Oncol.* 2022;12. doi: 10.3389/fonc.2022.775248
30. Zhong J, Lu J, Zhang G, et al. An overview of meta-analyses on radiomics: more evidence is needed to support clinical translation. *Insights Imaging.* 2023;14. doi: 10.1186/s13244-023-01437-2
31. Certificate of state registration of the computer program № 2022617324/ 19.04.2022. Morozov SP, Andreichenko AE, Chetverikov SF, et al. *Web-based tool for performing ROC analysis of diagnostic test results: № 2022616046.* (In Russ).
32. Giraud P, Giraud Ph, Gasnier A, et al. Radiomics and Machine Learning for Radiotherapy in Head and Neck Cancers. *Front. Oncol.* 2019;9. doi: 10.3389/fonc.2019.00174
33. Certificate of state registration of the computer program № 2023619686/ 15.05.2023. Vasilev YuA, Vladzimirskyy AV, Omelyanskaya OV, et al. *Web-based tool for quality control of datasets: № 2023617136.* (In Russ).
34. Gundersen OE, Kjetsmo S. State of the Art: Reproducibility in Artificial Intelligence. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence.* 2018;32(1). doi: 10.1609/aaai.v32i1.11503
35. Tortora M, Gemini L, Scaravilli A, et al. Radiomics Applications in Head and Neck Tumor Imaging: A Narrative Review. *Cancers.* 2023;15(4). doi: 10.3390/cancers15041174
36. Image Biomarker Standardisation Initiative (IBSI) [Internet]. [cited 1 Jan 2023]. Available from: <https://theibsi.github.io/>
37. Morozov SP, Vladzimirskyy AV, Klyashtornyi VG, et al. *Practice guidelines for the treatment of malignant tumors of the head and neck.* Moscow; 2019. (In Russ).
38. Buvat I, Orhac F. The Dark Side of Radiomics: On the Paramount Importance of Publishing Negative Results. *The Journal of Nuclear Medicine.* 2019;60(11):1543–1544. doi: 10.2967/jnumed.119.235325
39. Kocak B, Bulut E, Bayrak ON, et al. NEgatiVE results in Radiomics research (NEVER): A meta-research study of publication bias in leading radiology journals. *European Journal of Radiology.* 2023;163. doi: 10.1016/j.ejrad.2023.110830
40. Berenguer R, Pastor-Juan MR, Canales-Vázquez J, et al. Radiomics of CT Features May Be Nonreproducible and Redundant: Influence of CT Acquisition Parameters. *Radiology.* 2018;288(2). doi: 10.1148/radiol.2018172361
41. Morozov SP, Lindenbraten LD, Gabai PG, et al. *Fundamentals of medical imaging management.* Morozov SP, editor. Moscow: GEOTAR-Media; 2020. (In Russ). doi: 10.33029/9704-5247-9-MEN-2020-1-424
42. Khoruzhaya AN, Ahkmad ES, Semenov DS. The role of the quality control system for diagnostics of oncological diseases in radiomics. *Digital Diagnostics.* 2021;2(2):170–184. doi: 10.17816/DD60393

ОБ АВТОРАХ

* **Нанова Ольга Геннадьевна**, канд. биол. наук;
адрес: Россия, 127051, Москва, ул. Петровка, д. 24, стр. 1;
ORCID: 0000-0001-8886-3684;
eLibrary SPIN: 6135-4872;
e-mail: NanovaOG@zdrav.mos.ru

Васильев Юрий Александрович, канд. мед. наук;
ORCID: 0000-0002-0208-5218;
eLibrary SPIN: 4458-5608;
e-mail: npcmr@zdrav.mos.ru

AUTHORS' INFO

* **Olga G. Nanova**, Cand. Sci. (Biology)
address: 24/1 Petrovka street, 127051, Moscow, Russia;
ORCID: 0000-0001-8886-3684;
eLibrary SPIN: 6135-4872;
e-mail: NanovaOG@zdrav.mos.ru

Yuriy A. Vasilev, MD, Cand. Sci. (Medicine);
ORCID: 0000-0002-0208-5218;
eLibrary SPIN: 4458-5608;
e-mail: npcmr@zdrav.mos.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Блохин Иван Андреевич;

ORCID: 0000-0002-2681-9378;

eLibrary SPIN: 3306-1387;

e-mail: i.blokhin@npcmr.ru

Решетников Роман Владимирович, канд. физ.-мат. наук;

ORCID: 0000-0002-9661-0254;

eLibrary SPIN: 8592-0558;

e-mail: reshetnikov@fbb.msu.ru

Владимирский Антон Вячеславович, д-р мед. наук, профессор;

ORCID: 0000-0002-2990-7736;

eLibrary SPIN: 3602-7120;

e-mail: npcmr@zdrav.mos.ru

Омелянская Ольга Васильевна;

ORCID: 0000-0002-0245-4431;

eLibrary SPIN: 8948-6152;

e-mail: o.omelyanskaya@npcmr.ru

Ivan A. Blokhin;

ORCID: 0000-0002-2681-9378;

eLibrary SPIN: 3306-1387;

e-mail: i.blokhin@npcmr.ru

Roman V. Reshetnikov, Cand. Sci. (Physics and Mathematics);

ORCID: 0000-0002-9661-0254;

eLibrary SPIN: 8592-0558;

e-mail: reshetnikov@fbb.msu.ru

Anton V. Vladzimirsky, MD, Dr. Sci. (Medicine), Professor;

ORCID: 0000-0002-2990-7736;

eLibrary SPIN: 3602-7120;

e-mail: npcmr@zdrav.mos.ru

Olga V. Omelyanskaya;

ORCID: 0000-0002-0245-4431;

eLibrary SPIN: 8948-6152;

e-mail: o.omelyanskaya@npcmr.ru