Научная статья
УДК 616.98-006:615.849

ГЛУБОКОЕ ОБУЧЕНИЕ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СЕГМЕНТАЦИИ ОРГАНОВ РИСКА ПРИ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ ОПУХОЛЕЙ ГОЛОВЫ И ШЕИ

Телешова Маргарита Викторовна, кандидат медицинских наук, врач-детский онколог отделения клинической онкологии, Национальный медицинский исследовательский центр детской гематологии, онкологии и иммунологии им. Д. Рогачева, Россия, Москва, margaritatlsh@gmail.ru

Аннотация. Планирование лучевой терапии опухолей головы и шеи требует точного определения границ критических структур. Цель работы - оценить геометрическую и дозиметрическую достоверность автоматического выделения органов риска сверточной нейросетью в рутинной клинической практике.

Материалом послужили планирующие КТ-исследования пациентов, проходивших лечение по поводу новообразований головы и шеи. В когорту включили как стандартные случаи, так и сложные ситуации с двусторонним поражением лимфоузлов. Эталонные контуры двадцати одного органа риска формировали медицинские радиологи с последующей арбитражной проверкой онкологом-радиотерапевтом. Автоматическую сегментацию выполняли с помощью модифицированной U-Net-подобной архитектуры. Качество оценивали по коэффициенту сходства Дайса и 95-процентной хаусдорфовой дистанции; дополнительно анализировали влияние погрешностей сегментации на дозовые параметры и оценивали временные затраты на ручную коррекцию.

Алгоритм продемонстрировал высокую пространственную точность для крупных структур, где значения D составили 0,88–0,93. Сегментация малоразмерных объектов оказалась сложнее из-за артефактов и низкого тканевого контраста. Внедрение предсегментации сократило время контуровки с 42 до 6,5 минут. Дозиметрический аудит выявил, что для зон с высоким

градиентом дозы даже субмиллиметровые сдвиги границ меняют Dmax на 2-4 Гр.

Глубокое обучение обеспечивает надежную первичную сегментацию и существенно экономит время медицинского персонала. Однако для структур, расположенных в зонах экстремального дозового градиента, автоматические контуры требуют обязательной врачебной верификации и дозиметрического контроля во избежание лучевых повреждений.

Ключевые слова: лучевая терапия, опухоли головы и шеи, органы риска, автоматическая сегментация, глубокое обучение, сверточные нейронные сети, планирование лечения, компьютерная томография, дозиметрический контроль, коэффициент сходства Дайса.

Original article

DEEP LEARNING FOR AUTOMATIC SEGMENTATION OF ORGANS AT RISK IN HEAD AND NECK TUMOR RADIOTHERAPY

Teleshova Margarita Viktorovna, Candidate of Medical Sciences, Pediatric Oncologist, Dmitry Rogachev National Medical Research Center of Pediatric Hematology, Oncology and Immunology, Moscow, Russia, margaritatlsh@gmail.ru

Abstract. Planning radiation therapy for head and neck tumors requires accurate delineation of critical structure boundaries. The aim of this study was to evaluate the geometric and dosimetric accuracy of automatic organ-at-risk detection using a convolutional neural network in routine clinical practice.

The study was based on CT planning scans of patients undergoing treatment for head and neck tumors. The cohort included both standard cases and complex cases with bilateral lymph node involvement. Reference contours of twenty-one organs at risk were generated by medical radiologists and subsequently reviewed by a radiation oncologist. Automatic segmentation was performed using a modified U-Net-like

architecture. Quality was assessed using the Dice similarity coefficient and the 95% Hausdorff distance. The impact of errors on dose parameters and the time required for manual correction were also analyzed.

The algorithm demonstrated high spatial accuracy for large structures, with D values ranging from 0.88 to 0.93. Segmentation of small objects proved more challenging due to artifacts and low tissue contrast. The introduction of pre-segmentation reduced the contouring time from 42 to 6.5 minutes. A dosimetric audit revealed that for areas with a high dose gradient, even submillimeter boundary shifts alter the Dmax by 2–4 Gy.

Deep learning ensures reliable initial segmentation and significantly saves medical staff time. However, for structures located in areas of extreme dose gradient, automatic contours require mandatory physician verification and dosimetric monitoring to prevent radiation damage.

Keywords: radiotherapy, head and neck tumors, organs at risk, automatic segmentation, deep learning, convolutional neural networks, treatment planning, computed tomography, dosimetric monitoring, Dice similarity coefficient.

Актуальность исследования. Ручная контуровка органов риска занимает значительное время и характеризуется межэкспертной вариабельностью. В области головы и шеи анатомическая близость опухолевой мишени к критическим структурам, таким как ствол мозга, спинной мозг, зрительные нервы, хрусталики и околоушные слюнные железы [1], [2], диктует необходимость высочайшей точности при планировании лучевой терапии. Превышение толерантных доз облучения неизбежно ведет к тяжелым токсическим осложнениям, радикально снижающим качество жизни пациентов после завершения лечения [3]. Традиционный подход, при котором врач-радиационный онколог или медицинский физик выполняет посрезовую обводку анатомических структур на компьютерной томографии, требует от нескольких десятков минут до нескольких часов на одного больного [4]. Более того, даже

при участии высококвалифицированных специалистов неизбежно возникает разброс в интерпретации границ тканей, что документально подтверждено в крупных мультицентровых исследованиях. Такая вариабельность затрудняет стандартизацию лечебного процесса и воспроизведение результатов в разных клиниках [5].

Поиск путей оптимизации данного этапа подготовительной работы привел к интеграции методов машинного зрения в клиническую практику. Сверточные архитектуры, обученные на размеченных массивах медицинских изображений, демонстрируют способность извлекать сложные пространственные признаки, недоступные для классического порогового анализа. Современные модели, в частности U-Net-подобные архитектуры с пропускными соединениями, позволяют учитывать трехмерный контекст при анализе последовательности двумерных срезов, что важно при работе с изотропными и анизотропными воксельными данными КТ. Подобные инструменты способны за доли секунды формировать первичные карты вероятностей принадлежности вокселей к тому или иному анатомическому образованию, потенциально освобождая врача от рутинной механической работы.

Несмотря на обнадеживающие результаты, публикуемые в профильной литературе [6-8], внедрение автоматических инструментов сталкивается с барьером клинической приемлемости. Многие предложенные решения оценивались на ретроспективных подборках без прямого сопоставления с рутинной работой практикующих врачей. Для перехода от лабораторных прототипов к клиническому применению требуется строгая проверка, включающая сопоставление результатов автоматической сегментации не только с эталонными контурами, но и с контурами, созданными радиологами в условиях повседневной практики [9]. Важнейшим аспектом остается оценка не только объемного совпадения, но и точности воспроизведения поверхностных границ, поскольку именно погрешности на краях органа чаще всего приводят к дозиметрическим ошибкам при расчете планов облучения с модуляцией

интенсивности.

В связи с этим цель настоящего исследования заключалась в оценке достоверности автоматизированного выделения двадцати одного органа риска у пациентов с новообразованиями головы и шеи. В качестве базы сравнения выступили контуры, созданные опытными радиологами и согласованные профильным онкологом, а также независимые выборки из больничных и открытых репозиториев, включающих как стандартные клинические случаи, так и сложные ситуации с поражением лимфатических узлов. Мы сосредоточили внимание на объемных и поверхностных метриках сходства, таких как коэффициент Дайса, чтобы определить, способен ли вычислительный алгоритм обеспечивать уровень надежности, достаточный для безопасного использования в рутинном планировании облучения без необходимости тотальной ручной коррекции. Полученные данные позволят объективно оценить роль автоматических методов в современной радиационной онкологии и определить подходы к их интеграции в рабочие станции планирования лечения.

Степень разработанности проблемы исследования. Применение методов лучевой терапии с модуляцией интенсивности (IMRT) и объемной модуляционной дуговой терапии (VMAT) при злокачественных новообразованиях головы и шеи требует высочайшей точности при определении мишеней и критических структур. Анатомическая сложность данной области, характеризующаяся тесным соседством опухолевой ткани со стволом мозга, спинным мозгом, зрительным анализатором и слюнными железами, диктует необходимость жесткого соблюдения дозовых ограничений [10-12]. Традиционный подход, при котором врач-радиотерапевт выполняет посрезовую обводку анатомических структур на компьютерной томографии (КТ), сопряжен с существенными временными затратами и неизбежной межэкспертной вариабельностью.

Переход от систем с ручным конструированием признаков к алгоритмам глубокого обучения, в частности к сверточным нейронным сетям, существенно

изменил подходы к анализу медицинских изображений. Архитектуры типа U-Net, сочетающие учет контекстной информации с точной локализацией благодаря пропускным соединениям, показали высокую эффективность в задачах семантической сегментации [13-15]. Несмотря на обилие публикаций, посвященных автоматическому выделению анатомических структур, подавляющее большинство работ ограничивается ретроспективным анализом геометрических метрик на изолированных выборках. Клиническая приемлемость подобных алгоритмов, их реальное влияние на дозовое распределение и интеграция в рутинный рабочий процесс системы планирования лечения (ТПС) остаются недостаточно изученными [16], [17]. В связи с этим назрела необходимость проведения многоцентровых исследований, оценивающих не только пространственное совпадение контуров, но и дозиметрические последствия, временные затраты на ручную коррекцию, а также частоту возникновения клинически неприемлемых ошибок.

Материалы и методы исследования. Объектом исследования выступили планирующие КТ-изображения пациентов с опухолями головы и шеи, которым планировалось проведение курсов IMRT/VMAT. Для обеспечения репрезентативности и устойчивости модели была сформирована многоцентровая независимая выборка, объединившая данные University College London Hospitals (UCLH) и открытого репозитория The Cancer Imaging Archive (TCIA, набор Head-Neck Cetuximab). Когорта включала как стандартные клинические случаи, так и сложные ситуации с двусторонним поражением лимфатических узлов и выраженными анатомическими деформациями.

В качестве вычислительного инструмента была выбрана и модифицирована U-Net-подобная архитектура, адаптированная для работы с трехмерными массивами данных. Обучение и валидация модели проводились для автоматической сегментации двадцати одного органа риска, включая околоушные и поднижнечелюстные слюнные железы, ствол и спинной мозг, орбиты (включая хрусталики и зрительные нервы), а также глоточные

констрикторы. Эталонные контуры формировались опытными медицинскими радиологами и проходили независимую арбитражную проверку профильным онкологом-радиотерапевтом, специализирующимся на опухолях головы и шеи.

Оценку качества автоматической сегментации проводили по геометрическим показателям и показателям клинической применимости, включая временные затраты на ручную коррекцию. Пространственную точность измеряли с помощью коэффициента сходства Дайса (DSC) и 95-процентной хаусдорфовой дистанции (HD95). Дополнительно рассчитывали разницу объемов между автоматическими и эталонными контурами. Важной особенностью дизайна исследования стало использование показателей клинической применимости: фиксировали время, затраченное радиотерапевтом на ручную коррекцию сгенерированных алгоритмом контуров, а также регистрировали «опасные ошибки» - случаи пропуска критической структуры или ее фрагмента, которые могли привести к превышению допустимой дозы облучения.

Для анализа дозиметрического влияния на основе автоматических и вручную скорректированных контуров выполнялся обратный расчет планов IMRT/VMAT. Оценивались отклонения в дозных параметрах (D_{max}, D_{mean}) для каждого органа риска. Работу алгоритма оценивали на реальной рабочей станции ТПС; при этом анализировали процесс контроля качества и необходимость вмешательства медицинского физика (рисунок 1).

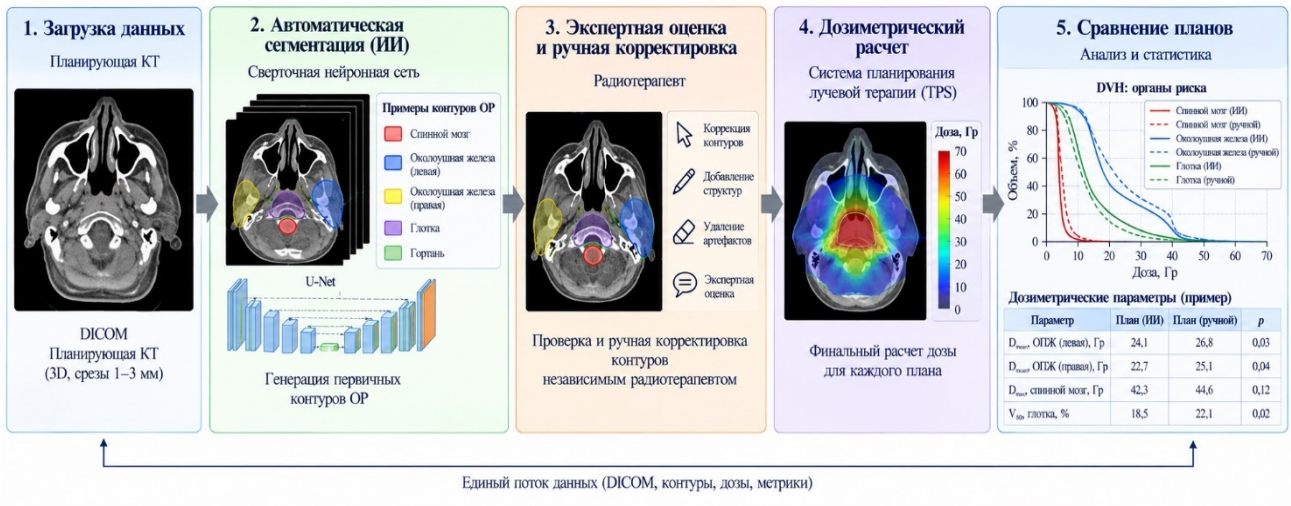


Рисунок 1 - Блок-схема рабочего процесса исследования (источник: разработано автором)

Результаты исследования. Анализ геометрических метрик выявил выраженную зависимость точности алгоритма от размера и контрастности анатомической структуры на КТ-срезах. Для крупных органов с четкими границами, таких как ствол мозга, спинной мозг и околоушные слюнные железы, модель продемонстрировала высокие значения DSC (в диапазоне 0,88–0,93) и минимальные отклонения HD95. Объемные различия для этих структур не превышали 3-5%, что свидетельствует о высокой устойчивости алгоритма к индивидуальным анатомическим вариациям.

Ситуация с малыми и низкоконтрастными структурами оказалась более сложной. Сегментация хрусталиков и зрительных нервов характеризовалась более низким средним DSC (0,72–0,78) и увеличенной HD95. Детальный разбор неудачных случаев показал, что алгоритм испытывал трудности в ситуациях, когда хрусталик имел атипичную плотность или сливался с окружающими тканями орбиты из-за артефактов от стоматологических имплантов. В четырех случаях из выборки TCIA модель полностью пропустила контур хрусталика, что было классифицировано как опасная ошибка, требующая обязательного вмешательства.

Оценка временных затрат подтвердила высокую эффективность внедрения алгоритма в клиническую практику. Среднее время, необходимое

радиотерапевту для создания контуров всех органов риска «с нуля», составляло 42 минуты. При использовании автоматической предсегментации время на проверку и ручную коррекцию контуров сократилось до 6,5 минут, что обеспечивает статистически значимую экономию рабочего времени без потери качества (рисунок 2).

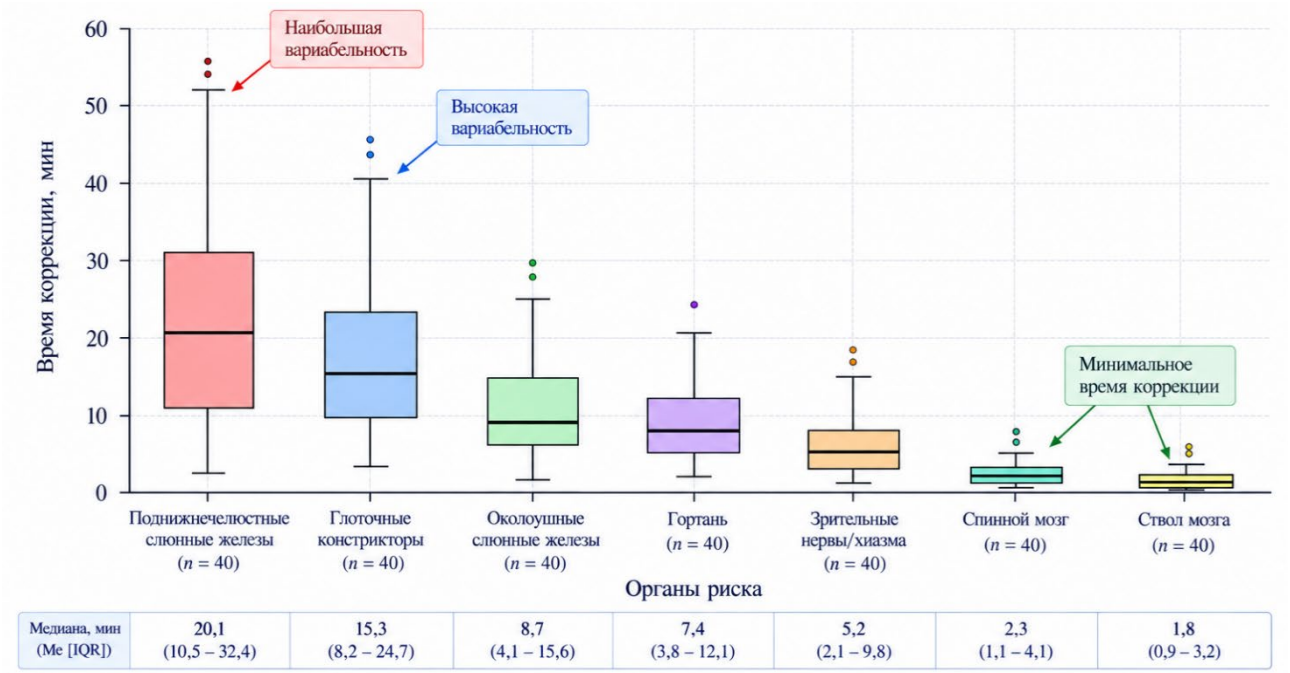


Рисунок 2 - Диаграмма размаха, иллюстрирующая время ручной коррекции контуров (в минутах) для различных групп органов риска (источник: разработано автором)

Дозиметрический анализ выявил, что для крупных органов риска геометрические погрешности автоматической сегментации нивелируются при расчете дозного распределения. Различия в средней дозе (D_{mean}) для околоушных слюнных желез между планами, построенными на автоматических и эталонных контурах, составили менее 0,5 Гр. Однако для структур, расположенных в зонах с высоким дозовым градиентом (например, зрительные нервы и ствол мозга), даже незначительное смещение границы контура на 1-2 мм приводило к изменению максимальной дозы (D_{max}) на 2-4 Гр, что имеет критическое значение при планировании радикального лечения.

Обсуждение результатов исследования. Полученные данные убедительно демонстрируют, что алгоритмы глубокого обучения достигли

уровня, достаточного для их использования в качестве надежного инструмента первичной сегментации в рутинной клинической практике. Высокие показатели DSC для ствола и спинного мозга подтверждают, что модель успешно извлекает пространственные признаки и корректно определяет границы критических структур, облучение которых строго лимитировано. Это позволяет радиотерапевту сосредоточить внимание на более сложных задачах, таких как обводка мишеней и зон лимфатического дренирования.

Вместе с тем результаты сегментации малых структур, в частности хрусталиков, указывают на ограничения компьютерной томографии при их автоматическом выделении. Низкий тканевой контраст и наличие артефактов от металлических конструкций в полости рта создают условия, при которых алгоритм может ошибиться. Выявленные случаи полного пропуска хрусталика подчеркивают необходимость врачебной проверки результатов автоматической обработки. Внедрение подобных систем требует перестройки протоколов контроля качества: автоматический контур должен рассматриваться не как финальный результат, а как «черновик», подлежащий обязательной верификации врачом. При этом общее время работы специалиста существенно сокращается, поскольку коррекция существующего контура требует меньше усилий, чем его построение с нуля.

Дозиметрическая оценка показала, что геометрическая метрика DSC, будучи удобной для математического сравнения, не всегда отражает клиническую значимость погрешности. Смещение границы ствола мозга на несколько миллиметров при приемлемом значении DSC может привести к недопустимому превышению толерантной дозы в конкретной точке. Следовательно, критерием качества алгоритма должна служить не только пространственная точность, но и дозовая эквивалентность планов, а также частота возникновения опасных ошибок, способных привести к тяжелым лучевым повреждениям.

Ограничениями данного исследования являются ретроспективный

характер сбора данных и отсутствие в выборке пациентов с выраженными постлучевыми или послеоперационными анатомическими изменениями, которые могут существенно изменять привычные анатомические ориентиры. Дальнейшую работу следует сосредоточить на расширении обучающих выборок за счет сложных клинических случаев и на разработке механизмов, позволяющих выделять области, в которых уверенность модели в предсказании низка, чтобы врач мог уделять им повышенное внимание на этапе контроля качества.

Таким образом, автоматическая сегментация органов риска с использованием сверточных нейронных сетей является точным и клинически применимым методом, способным оптимизировать процесс планирования лучевой терапии. Интеграция алгоритма в рабочую станцию ТПС обеспечивает значимую экономию времени медицинского персонала при сохранении высокого уровня безопасности пациента, при условии соблюдения строгих протоколов врачебного контроля качества.

Выводы. Подводя итоги исследования, следует отметить, что интеграция сверточных нейросетей в планирование лучевой терапии опухолей головы и шеи имеет не только техническое, но и клинико-организационное значение. Полученные данные убедительно демонстрируют, что алгоритмическое выделение крупных анатомических структур с высокой тканевой контрастностью достигает уровня, сопоставимого с работой опытного медицинского радиолога. Однако перенос этих результатов на все без исключения органы риска недопустим. Безопасность пациента и радиобиологическая обоснованность плана облучения диктуют необходимость строгого регламентирования условий внедрения подобных вычислительных инструментов в клиническую практику.

Одним из основных условий безопасного применения автоматических методов является разделение контурируемых объектов с учетом их анатомических и топографических особенностей. Как показал наш анализ,

геометрические метрики пространственного совпадения, в частности коэффициент Дайса, обладают ограниченной прогностической ценностью при оценке малоразмерных и низкоконтрастных структур, таких как хрусталики или зрительные нервы. В зонах с экстремально высокими дозовыми градиентами даже субмиллиметровая погрешность автоматической границы, не отражающаяся существенно на объемных показателях, способна привести к критическому превышению толерантных доз. Следовательно, обязательным стандартом качества должно стать не просто математическое сопоставление контуров, а регулярный дозиметрический аудит, оценивающий реальное влияние погрешностей сегментации на параметры облучения конкретной критической структуры.

Ключевым условием клинической приемлемости выступает интеграция алгоритма в рабочий поток системы планирования лечения с четким распределением ролей. Автоматическая сегментация не должна рассматриваться как финальный и безальтернативный результат, а исключительно как предварительный вариант, требующий обязательной врачебной проверки. Контроль качества следует организовать так, чтобы врач-радиотерапевт тратил время на целенаправленную коррекцию участков, в которых уверенность модели в предсказании низка. Такой формат взаимодействия врача и алгоритма, при котором внимание специалиста сосредоточено на сложных анатомических случаях и срезах с артефактами, позволяет существенно сократить временные затраты без ущерба для точности.

Критическим аспектом минимизации рисков остается проблема опасных ошибок, когда алгоритм полностью игнорирует наличие анатомической структуры или ее значимого фрагмента. Выявленные нами случаи пропуска контуров хрусталиков при наличии стоматологических артефактов указывают на необходимость разработки и внедрения механизмов оценки неопределенности предсказаний. Будущие модификации вычислительных моделей должны не только генерировать бинарную маску, но и предоставлять карту вероятностей,

позволяющую врачу мгновенно идентифицировать регионы, где модель испытывает сомнения. До внедрения подобных механизмов в клиническое программное обеспечение предотвращение критических пропусков должно обеспечиваться обязательным визуальным контролем, выполняемым медицинским физиком или радиологом.

Обобщая результаты, можно утверждать, что переход к полностью автоматизированной сегментации органов риска при опухолях головы и шеи ожидается в ближайшем будущем, однако требует надежной методологической базы. Устойчивость и надежность вычислительных инструментов напрямую зависят от репрезентативности обучающих выборок, которые обязаны включать мультицентровые данные, охватывающие максимальное разнообразие клинических случаев, аппаратурных артефактов и анатомических вариаций. Только при условии строгого дозиметрического контроля, сохранения обязательной врачебной проверки и регулярного обновления алгоритма на основе независимых валидационных когорт методы глубокого обучения смогут стать безопасным и эффективным инструментом повышения производительности радиотерапевтических отделений.

Список литературы

1. Peng Y., Liu Y., Shen G., Chen Z., Chen M., Miao J., Zhao C., Deng J., Qi Z., Deng X. Improved Accuracy of Auto-Segmentation of Organs at Risk in Radiotherapy Planning for Nasopharyngeal Carcinoma Based on Fully Convolutional Neural Network Deep Learning // Oral Oncology. 2023. Vol. 136. Art. 106261. DOI: 10.1016/j.oraloncology.2022.106261.

2. Lucido J. J., DeWees T. A., Leavitt T. R. et al. Validation of Clinical Acceptability of Deep-Learning-Based Automated Segmentation of Organs-at-Risk for Head-and-Neck Radiotherapy Treatment Planning // Frontiers in Oncology. 2023. Vol. 13. Art. 1137803. DOI: 10.3389/fonc.2023.1137803.

3. Liu P., Sun Y., Zhao X., Yan Y. Deep Learning Algorithm Performance in Contouring Head and Neck Organs at Risk: A Systematic Review and Single-Arm

Meta-Analysis // BioMedical Engineering OnLine. 2023. Vol. 22. Art. 104. DOI: 10.1186/s12938-023-01159-y.

4. Кудашкина Ю. А., Рыжикова О. А., Куфелкина А. А., Блиганов П. И., Черных М. В. Автоматизация процессов лучевой терапии: оптимизация оконтуривания в лучевой терапии с помощью машинного обучения // Медицинская физика. 2025. № 2. С. 79

5. Wang J., Peng Y. MHL-Net: A Multistage Hierarchical Learning Network for Head and Neck Multiorgan Segmentation // IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics. 2023. Vol. 27. No. 8. P. 4074–4085. DOI: 10.1109/JBHI.2023.3275746.

6. Czipczer V., Kolozsvári B., Deák-Karancsi B. et al. Comprehensive Deep Learning-Based Framework for Automatic Organs-at-Risk Segmentation in Head-and-Neck and Pelvis for MR-Guided Radiation Therapy Planning // Frontiers in Physics. 2023. Vol. 11. Art. 1236792. DOI: 10.3389/fphy.2023.1236792.

7. Luan S., Wei C., Ding Y., Xue X., Wei W., Yu X., Wang X., Ma C., Zhu B. PCG-Net: Feature Adaptive Deep Learning for Automated Head and Neck Organs-at-Risk Segmentation // Frontiers in Oncology. 2023. Vol. 13. Art. 1177788. DOI: 10.3389/fonc.2023.1177788.

8. Luan S., Wu K., Wu Y., Zhu B., Wei W., Xue X. Accurate and Robust Auto-Segmentation of Head and Neck Organ-at-Risks Based on a Novel CNN Fine-Tuning Workflow // Journal of Applied Clinical Medical Physics. 2024. Vol. 25. No. 1. Art. e14248. DOI: 10.1002/acm2.14248.

9. Podobnik G., Ibragimov B., Peterlin P., Strojan P., Vrtovec T. et al. HaN-Seg: The Head and Neck Organ-at-Risk CT and MR Segmentation Challenge // Radiotherapy and Oncology. 2024. Vol. 198. Art. 110410. DOI: 10.1016/j.radonc.2024.110410.

10. Johnson C. L., Press R. H., Simone C. B. II et al. Clinical Validation of Commercial Deep-Learning Based Auto-Segmentation Models for Organs at Risk in the Head and Neck Region: A Single Institution Study // Frontiers in Oncology. 2024. Vol. 14. Art. 1375096. DOI: 10.3389/fonc.2024.1375096.

11. Temple S. W. P., Rowbottom C. G. Gross Failure Rates and Failure Modes for a

Commercial AI-Based Auto-Segmentation Algorithm in Head and Neck Cancer Patients // Journal of Applied Clinical Medical Physics. 2024. Vol. 25. No. 6. Art. e14273. DOI: 10.1002/acm2.14273.

12. Lê A. T., Sambourg K., Sun R., Deny N., Cifliku V., Rouhi R., Deutsch E., Fournier-Bidoz N., Robert C. Head and Neck Automatic Multi-Organ Segmentation on Dual-Energy Computed Tomography // Physics and Imaging in Radiation Oncology. 2024. Vol. 32. Art. 100654. DOI: 10.1016/j.phro.2024.100654.

13. Cubero L., Hémon C., Barateau A., Castelli J., de Crevoisier R., Acosta O., Pascau J. Deep Learning-Based Segmentation of Head and Neck Organs at Risk on CBCT Images with Dosimetric Assessment for Radiotherapy // Physics in Medicine & Biology. 2025. Vol. 70. No. 7. DOI: 10.1088/1361-6560/adbf63.

14. Pang E. P. P., Tan H. Q., Wang F. et al. Multicentre Evaluation of Deep Learning CT Autosegmentation of the Head and Neck Region for Radiotherapy // npj Digital Medicine. 2025. Vol. 8. Art. 312. DOI: 10.1038/s41746-025-01624-z.

15. Sharma D., Singh G., Burela N., Gayen S., Aishwarya G., Nangia S. Geometric and Dosimetric Evaluation of a RayStation Deep Learning Model for Auto-Segmentation of Organs at Risk in a Real-World Head and Neck Cancer Dataset // Clinical Oncology. 2025. Vol. 41. Art. 103796. DOI: 10.1016/j.clon.2025.103796.

16. Podobnik G., Borg C., Debono C. J., Mercieca S., Vrtovec T. Geometric, Dosimetric and Psychometric Evaluation of Three Commercial AI Software Solutions for OAR Auto-Segmentation in Head and Neck Radiotherapy // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. Art. 33396. DOI: 10.1038/s41598-025-18598-3.

17. Podobnik G., Ibragimov B., Peterlin P., Strojan P., Vrtovec T. Dosimetric Assessment of Deep Learning Based Organ-at-Risk Segmentation: Insights from the HaN-Seg Challenge // Radiotherapy and Oncology. 2026. Vol. 217. Art. 111387. DOI: 10.1016/j.radonc.2026.111387.

References

1. Peng Y., Liu Y., Shen G., Chen Z., Chen M., Miao J., Zhao C., Deng J., Qi Z., Deng X. Improved Accuracy of Auto-Segmentation of Organs at Risk in Radiotherapy

Planning for Nasopharyngeal Carcinoma Based on Fully Convolutional Neural Network Deep Learning // Oral Oncology. 2023. Vol. 136. Art. 106261. DOI: 10.1016/j.oraloncology.2022.106261.

2. Lucido J. J., DeWees T. A., Leavitt T. R. et al. Validation of Clinical Acceptability of Deep-Learning-Based Automated Segmentation of Organs-at-Risk for Head-and-Neck Radiotherapy Treatment Planning // Frontiers in Oncology. 2023. Vol. 13. Art. 1137803. DOI: 10.3389/fonc.2023.1137803.

3. Liu P., Sun Y., Zhao X., Yan Y. Deep Learning Algorithm Performance in Contouring Head and Neck Organs at Risk: A Systematic Review and Single-Arm Meta-Analysis // BioMedical Engineering OnLine. 2023. Vol. 22. Art. 104. DOI: 10.1186/s12938-023-01159-y.

4. Kudashkina Yu. A., Ry`zhikova O. A., Kufelkina A. A., Bliganov P. I., Cherny`x M. V. Avtomatizaciya processov luchevoj terapii: optimizaciya okonturivaniya v luchevoj terapii s pomoshh`yu mashinnogo obucheniya // Medicinskaya fizika. 2025. № 2. S. 79.

5. Wang J., Peng Y. MHL-Net: A Multistage Hierarchical Learning Network for Head and Neck Multiorgan Segmentation // IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics. 2023. Vol. 27. No. 8. P. 4074–4085. DOI: 10.1109/JBHI.2023.3275746.

6. Czipczer V., Kolozsvári B., Deák-Karancsi B. et al. Comprehensive Deep Learning-Based Framework for Automatic Organs-at-Risk Segmentation in Head-and-Neck and Pelvis for MR-Guided Radiation Therapy Planning // Frontiers in Physics. 2023. Vol. 11. Art. 1236792. DOI: 10.3389/fphy.2023.1236792.

7. Luan S., Wei C., Ding Y., Xue X., Wei W., Yu X., Wang X., Ma C., Zhu B. PCG-Net: Feature Adaptive Deep Learning for Automated Head and Neck Organs-at-Risk Segmentation // Frontiers in Oncology. 2023. Vol. 13. Art. 1177788. DOI: 10.3389/fonc.2023.1177788.

8. Luan S., Wu K., Wu Y., Zhu B., Wei W., Xue X. Accurate and Robust Auto-Segmentation of Head and Neck Organ-at-Risks Based on a Novel CNN Fine-Tuning Workflow // Journal of Applied Clinical Medical Physics. 2024. Vol. 25. No. 1. Art.

e14248. DOI: 10.1002/acm2.14248.

9. Podobnik G., Ibragimov B., Peterlin P., Strojan P., Vrtovec T. et al. HaN-Seg: The Head and Neck Organ-at-Risk CT and MR Segmentation Challenge // Radiotherapy and Oncology. 2024. Vol. 198. Art. 110410. DOI: 10.1016/j.radonc.2024.110410.

10. Johnson C. L., Press R. H., Simone C. B. II et al. Clinical Validation of Commercial Deep-Learning Based Auto-Segmentation Models for Organs at Risk in the Head and Neck Region: A Single Institution Study // Frontiers in Oncology. 2024. Vol. 14. Art. 1375096. DOI: 10.3389/fonc.2024.1375096.

11. Temple S. W. P., Rowbottom C. G. Gross Failure Rates and Failure Modes for a Commercial AI-Based Auto-Segmentation Algorithm in Head and Neck Cancer Patients // Journal of Applied Clinical Medical Physics. 2024. Vol. 25. No. 6. Art. e14273. DOI: 10.1002/acm2.14273.

12. Lê A. T., Sambourg K., Sun R., Deny N., Cifliku V., Rouhi R., Deutsch E., Fournier-Bidoz N., Robert C. Head and Neck Automatic Multi-Organ Segmentation on Dual-Energy Computed Tomography // Physics and Imaging in Radiation Oncology. 2024. Vol. 32. Art. 100654. DOI: 10.1016/j.phro.2024.100654.

13. Cubero L., Hémon C., Barateau A., Castelli J., de Crevoisier R., Acosta O., Pascau J. Deep Learning-Based Segmentation of Head and Neck Organs at Risk on CBCT Images with Dosimetric Assessment for Radiotherapy // Physics in Medicine & Biology. 2025. Vol. 70. No. 7. DOI: 10.1088/1361-6560/adbf63.

14. Pang E. P. P., Tan H. Q., Wang F. et al. Multicentre Evaluation of Deep Learning CT Autosegmentation of the Head and Neck Region for Radiotherapy // npj Digital Medicine. 2025. Vol. 8. Art. 312. DOI: 10.1038/s41746-025-01624-z.

15. Sharma D., Singh G., Burela N., Gayen S., Aishwarya G., Nangia S. Geometric and Dosimetric Evaluation of a RayStation Deep Learning Model for Auto-Segmentation of Organs at Risk in a Real-World Head and Neck Cancer Dataset // Clinical Oncology. 2025. Vol. 41. Art. 103796. DOI: 10.1016/j.clon.2025.103796.

16. Podobnik G., Borg C., Debono C. J., Mercieca S., Vrtovec T. Geometric, Dosimetric and Psychometric Evaluation of Three Commercial AI Software Solutions

for OAR Auto-Segmentation in Head and Neck Radiotherapy // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. Art. 33396. DOI: 10.1038/s41598-025-18598-3.

17. Podobnik G., Ibragimov B., Peterlin P., Strojan P., Vrtovec T. Dosimetric Assessment of Deep Learning Based Organ-at-Risk Segmentation: Insights from the HaN-Seg Challenge // Radiotherapy and Oncology. 2026. Vol. 217. Art. 111387. DOI: 10.1016/j.radonc.2026.111387.

Статья поступила в редакцию 18.08.2026; одобрена после рецензирования 25.09.2026; принята к публикации 23.10.2026.

The article was submitted 18.08.2026; approved after reviewing 25.09.2026; accepted for publication 23.10.2026.