

УДК 004.931

DOI: [10.26102/2310-6018/2024.46.3.013](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.46.3.013)

Применение искусственных нейронных сетей для поиска объектов на медицинских изображениях

А.В. Руденко¹, М.А. Руденко¹, И.Л. Каширина²✉

¹Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского, Симферополь, Российская Федерация

²Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация

Резюме. Статья посвящена вопросам применения технологий искусственных нейронных сетей для определения объектов на медицинских изображениях, в том числе на изображениях внутренних органов человека, полученных в результате проведения процедуры компьютерной томографии. Целью данного исследования был выбор метода анализа медицинских изображений и его реализация в системе поддержки принятия решений в хирургии и урологии при диагностике мочекаменной болезни человека. В статье исследована применимость для решения различных задач обнаружения объектов на медицинских изображениях методов классификации, детектирования и сегментации. Показано, что для использования в системе поддержки принятия врачебных решений при диагностике мочекаменной болезни с целью планирования дальнейшего хирургического вмешательства лучше всего подходит детектирование. Поэтому в статье рассмотрены основные современные нейросетевые архитектуры, применимые для решения задачи детектирования. Для решения задачи детектирования объектов на медицинских изображениях, полученных по результатам компьютерной томографии внутренних органов человека, обоснована целесообразность применения нейросети архитектуры YOLO. По результатам вычислительного эксперимента выявлены проблемные места, связанные с детектированием сетью YOLO объектов почек и камней. Для повышения точности метода предложено использовать алгоритм нечеткой оценки результатов детектирования объектов нейросетью архитектуры YOLO. Результаты детектирования изображений нейросетью YOLO после ее модификации позволяют провести дальнейшие расчеты параметров найденных объектов для планирования хирургического вмешательства.

Ключевые слова: компьютерное зрение, медицинские изображения, классификация, детектирование, сегментация, нейронные сети, компьютерная томография, мочекаменная болезнь.

Благодарности: Исследования выполнены при финансовой поддержке ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере», программа «Старт», конкурс «Старт-Искусственный интеллект-1» (I очередь), заявка С1ИИ-112266, договор № 27ГС1ИИС12-D7/71365.

Для цитирования: Руденко А.В., Руденко М.А., Каширина И.Л. Применение технологий компьютерного зрения для поиска объектов на медицинских изображениях. Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2024;12(3). URL: <https://moitvivr.ru/ru/journal/pdf?id=1630> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.46.3.013

The use of artificial neural networks to search for objects in medical images

A.V. Rudenko¹, M.A. Rudenko¹, I.L. Kashirina²✉

¹V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, the Russian Federation

²Voronezh State University, Voronezh, the Russian Federation

Abstract. The article is devoted to the use of artificial neural network technologies to identify objects in medical images, including images of human internal organs obtained as a result of a computed tomography procedure. The purpose of this study was to select a method for analyzing medical images and its implementation in a decision support system in surgery and urology when diagnosing human urolithiasis. The article examines the applicability of classification, detection and segmentation methods for solving various problems of object detection in medical images. It has been shown that detection is best suited for use in a medical decision support system for diagnosing urolithiasis for the purpose of planning further surgical intervention. Therefore, the article discusses the main modern neural network architectures applicable to solving the detection problem. To solve the problem of detecting objects in medical images obtained from the results of computed tomography of human internal organs, the feasibility of using a neural network of the YOLO architecture is justified. Based on the results of a computational experiment, problem areas associated with the detection of kidney objects and stones by the YOLO network were identified. To increase the accuracy of the method, it is proposed to use an algorithm for fuzzy estimation of object detection results using a neural network of the YOLO architecture. The results of image detection by the YOLO neural network after its modification allow further calculations of the parameters of the found objects for planning surgical intervention.

Keywords: computer vision, medical images, classification, detection, segmentation, neural networks, computed tomography, urolithiasis.

Acknowledgements: The research was carried out with the financial support of the Federal State Budgetary Institution "Fund for the Promotion of Small Forms of Enterprises in the Scientific and Technical field", the Start program, the Start-Artificial Intelligence-1 competition (first stage), application C1П-112266, contract No. 27GS1IIS12-D7/71365.

For citation: Rudenko A.V., Rudenko M.A., Kashirina I.L. Application of Computer Vision Technologies to search for objects in medical images. Modeling, optimization and information technology. 2024;12(3). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1630> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.46.3.013 (In Russ.).

Введение

Технологии компьютерного зрения и искусственного интеллекта находят применение в разных сферах человеческой деятельности. Важным и интересным направлением, где возможно применение данных технологий, является анализ объектов на медицинских изображениях (МИ). На сегодняшний день анализ МИ и поиск объектов на них широко применяется в медицинской диагностике – от анализа крови до магнитно-резонансной томографии. Анализ МИ играет важную роль в оказании клинической помощи и лечении заболеваний. Например, анализ рентгеновских снимков является лучшим подходом для диагностики пневмонии. Разработка системы автоматизированного анализа МИ связана с необходимостью долгой и плотной работы медиков и ИТ-специалистов. Однако, как правило, большинство медицинских учреждений ориентированы в первую очередь на лечение больных, а не на проведение подобных исследований, что затрудняет процесс создания таких систем.

До недавнего времени задачи анализа МИ решались с использованием различных алгоритмов обработки изображений, в том числе алгоритмов адаптивной фильтрации и усиления, алгоритмов, основанных на использовании гистограмм градиентов, алгоритмов каскадных классификаторов на основе метода Виолы-Джонса, алгоритмов, основанных на методах контурного анализа и др. Традиционные методы анализа МИ и поиска на них объектов достигли своего предела производительности [1–4].

Поэтому существует необходимость развития современных инструментов анализа медицинских изображений на основе искусственных нейронных сетей (ИНС), а также анализе возможностей данных инструментов. В настоящее время существуют следующие методы анализа медицинских изображений: классификация объектов на

изображениях, детектирование объектов на изображениях, сегментация объектов на изображениях. Каждый из методов предназначен для решения разного рода задач в медицине при постановке диагноза. Применение ИНС в данных методах анализа МИ позволяет значительно ускорить процесс обработки изображений и выявления заданных медицинских патологий на МИ.

Целью данного исследования был выбор метода анализа МИ и его реализация в системе поддержки принятия решений в хирургии и урологии при диагностике мочекаменной болезни человека.

Материалы и методы

Классификация объектов на медицинских изображениях с помощью ИНС

Классификация объектов на медицинских изображениях позволяет определить наличие или отсутствие какой-либо медицинской патологии, например, на снимках, полученных в результате ногтевой капилляроскопии (Рисунок 1) [5].

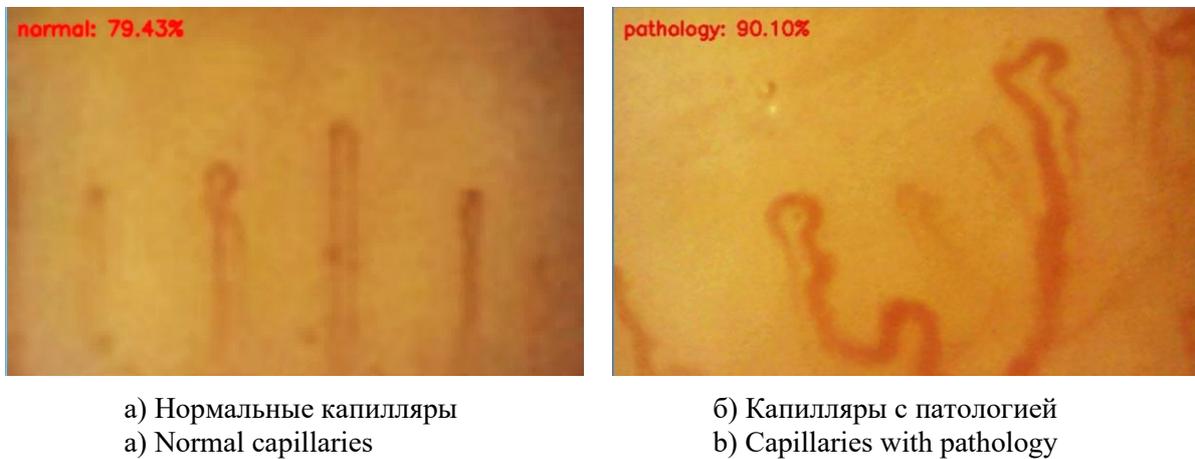


Рисунок 1 – Определение нормы (а) и наличия патологий (б) на снимках ногтевых капилляров с помощью ИНС

Figure 1 – Determination of the norm (a) and the presence of pathologies (b) on the images of nail capillaries using ANN

Метод может быть применен для быстрого предварительного диагностирования заболевания. Однако с помощью него нельзя локализовать на снимке место обнаруженной патологии.

Детектирование объектов на медицинских изображениях с использованием ИНС

Детектирование объектов на МИ с использованием ИНС позволяет не только отличить изображения с патологией или без таковой, но и локализовать место патологии на снимке. Кроме того, детектирование позволяет находить на изображениях несколько объектов различных заданных классов, вычислить размеры найденных объектов, что поможет медикам-диагностам в постановке правильного диагноза.

Например, детектирование объектов на снимках, полученных по результатам ногтевой капилляроскопии, показало присутствие на снимке как нормальных капилляров, так и капилляров с патологией (деформированных петель, коротких петель, перекрестных петель) (Рисунок 2) [6].

В результате детектирования объектов на МИ с помощью ИНС вычисляются следующие параметры: класс найденного объекта, координаты центра, размеры по вертикали и горизонтали ограничивающего найденный объект прямоугольника.

Полученные параметры в дальнейшем можно использовать для расчетов различных характеристик, необходимых медикам для правильной постановки диагноза: размеры объекта, количество объектов, отношение патологических объектов к общему количеству найденных объектов и других параметров [6, 7].

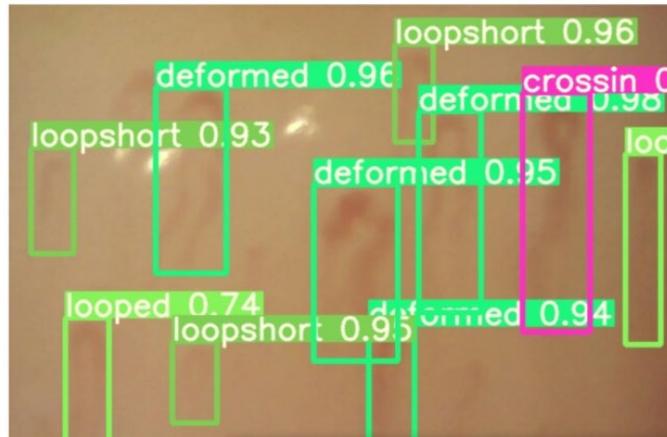


Рисунок 2 – Результат детектирования объектов ИНС на изображении, полученном при капилляроскопии ногтевого ложа

Figure 2 – The result of detection of ANN objects in the image obtained by capillaroscopy of the nail bed

Сегментация объектов на медицинских изображениях с использованием ИНС

Наиболее широкое применение для анализа объектов на МИ с помощью ИНС нашли методы сегментации. Сегментация является наиболее сложной задачей среди методов анализа МИ, поскольку результаты сегментации медицинских изображений должны быть очень точными, границы найденных масок объектов должны точно совпадать с найденными объектами, в противном случае в реальных клинических условиях даже незначительные ошибки сегментации могут привести к ошибкам в постановке диагноза, назначении неправильного лечения [8, 9].

Наибольшее развитие методы сегментации с использованием ИНС различных архитектур получили в период пандемии COVID-19, поскольку именно в этот период производилось очень большое количество процедур компьютерной томографии (КТ) и магниторезонансной томографии (МРТ) легких [10]. Полученные в результате проведенных процедур данные стали источником для создания датасетов для обучения нейросетей с целью дальнейшего анализа методами классификации, детектирования и сегментации. На основе результатов КТ и МРТ были созданы датасеты открытого доступа с разметкой как для детектирования, так и для сегментации, позволяющие обучать нейросети различных архитектур для диагностирования различных заболеваний легких (Рисунок 3) [11].

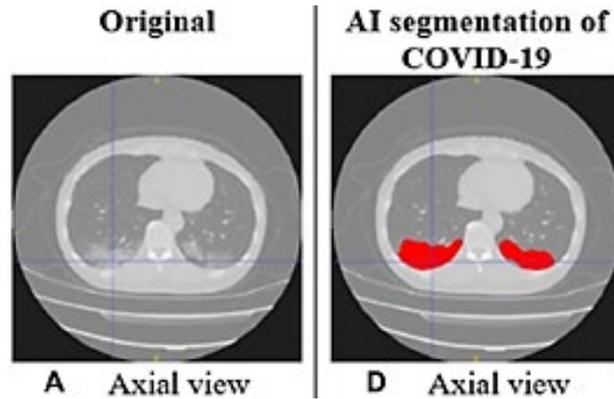


Рисунок 3 – Результат сегментации патологии COVID-19 с помощью нейросети на изображениях легких, полученных в результате процедуры КТ
Figure 3 – The result of segmentation of COVID-19 pathology using a neural network on lung images obtained as a result of CT procedure

Однако, для большинства других внутренних органов в открытых источниках датасеты достаточного размера пока отсутствуют. Поэтому применение сегментации для анализа МИ при диагностике других заболеваний требует тщательного отбора изображений, содержащих выбранную медицинскую патологию, кропотливой и трудоемкой разметки датасета.

В результате сегментации объектов на МИ с помощью ИНС получают изображения, на которых выделены контуры заданных медицинских патологий, а также нейросети определяют следующие параметры: класс найденного объекта, координаты точек области маски, выделяющей найденный объект.

Нейросети, применяемые для анализа медицинских изображений

В настоящее время существует достаточно большое количество архитектур сверточных нейронных сетей (СНС), применяемых при разработке технологий компьютерного зрения: LeNet-5, AlexNet, VGG-16, ResNet-50, Xception, ResNets, R-CNN, Fast RCNN, YOLO. Почти все архитектуры CNN следуют одним и тем же общим принципам проектирования: последовательного применения сверточных слоев к входным данным, периодического уменьшения пространственных размеров и увеличения количества карт признаков объектов [12, 13].

В последнее время для решения задач анализа медицинских изображений широкое распространение получили алгоритмы, основанные на применении региональных глубоких сверточных нейронных сетей (Regional Convolutional Neural Networks, RCNN) и сетей семейства YOLO, которые ориентированы на решение задачи обнаружения объектов с одновременной их классификацией.

Исходная реализация RCNN базируется на использовании специальных алгоритмов предобработки – алгоритмов region-proposal-function, обеспечивающих выделение так называемых областей интереса, в которых потенциально могут находиться интересующие нас объекты. Такой «специализированный» подход предлагает сократить вычислительные затраты, а также добиться высокой точности классификации объектов. Точность сетей семейства RCNN достигается, в том числе, за счет временной сложности: они требуют нескольких проходов при анализе одного изображения. Архитектура RCNN включает несколько компонентов – сверточную сеть, сеть выделения областей интереса (ROI) и сеть предложений регионов (RPN). Любая из них может служить узким местом для других.

YOLO – это сеть, предназначенная для идентификации и распознавания объектов на изображениях в реальном времени. Это аббревиатура от You Only Look Once («ты

смотришь только один раз», то есть изображение анализируется за один проход) [14]. YOLO накладывает на изображение сетку размера $s \times s$. Для каждой из полученных ячеек определяется вероятность принадлежности к каждому возможному классу. Отдельно обговаривается, что одна ячейка может принадлежать нескольким классам (ситуация, когда один объект частично загорает другой). Далее сеть визуализирует полученные результаты, очерчивая рамками найденные объекты, как показано на Рисунке 4. Главным преимуществом YOLO является сравнительно небольшие затраты времени на анализ изображения и простота использования.

В настоящее время последней версией нейросети данной архитектуры является YOLOv10, которую авторы представили в июне 2024 г. YOLOv10 умеет решать задачи классификации, детектирования, сегментации и трекинга объектов на видео [14]. Однако такое разнообразие решаемых задач достигается за счет увеличения вычислительной сложности. Поэтому, если требуется только решение задачи детектирования, то более оптимальным выбором может оказаться версия YOLOv5.

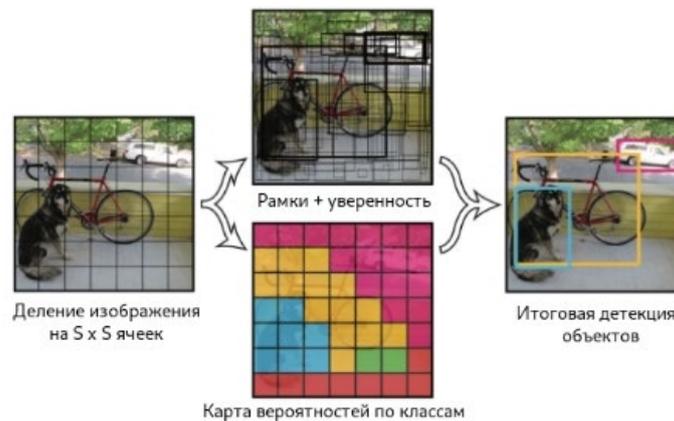


Рисунок 4 – Схема работы алгоритма YOLO
Figure 4 – The scheme of the YOLO algorithm

Диагностика мочекаменной болезни человека по МИ, полученным в результате процедуры компьютерной томографии

Остановимся подробнее на задаче диагностики мочекаменной болезни (МКБ) по результатам компьютерной томографии [15].

Актуальность исследования мочекаменной болезни определяется тем, что с каждым годом число больных в развитых странах, в том числе в России, неуклонно растет в связи с увеличением продолжительности жизни, изменением образа жизни, питания людей и химического состава воды. МКБ занимает второе место по частоте среди всех больных с урологической патологией и имеет свои эндемичные зоны как в России, так и в других странах мира.

Компьютерная томография – медицинское рентгенологическое исследование, основанное на послойном исследовании структуры внутренних органов и систем. Результаты этой процедуры сохраняются в виде DICOM файлов. В результате проведения исследования врач-специалист получает большой набор изображений срезов внутренних органов по каждому пациенту. Далее, с помощью специализированного программного обеспечения он просматривает полученные срезы для установки точной локализации, определения формы и размеров конкрементов, производит разметку среза. После разметки срезов специалист определяет параметры объектов – размеры и плотность почек и камней.

Очевидны пути оптимизации этого процесса с помощью ИНС. На полученных по результатам КТ медицинских изображениях необходимо определять объекты заданных классов (почки, камни), рассчитывать параметры (размеры, плотность, координаты) с целью поддержки принятия решений при постановке диагноза и планировании дальнейшего хирургического вмешательства.

Результаты и обсуждение

Медицинские данные для исследования были предоставлены Клиническим медицинским многопрофильным центром имени Святителя Луки г. Симферополя, который обладает современной базой радиологии и уникальными методиками лечения МКБ.

На основании проведенных исследований был сделан вывод, что для применения в системе поддержки принятия врачебных решений в хирургии и урологии с использованием технологий компьютерного зрения при лечении МКБ человека в качестве нейросети для определения объектов на медицинских изображениях, полученных в результате проведения компьютерной томографии, наилучшим образом подходит СНС архитектуры YOLO. Нейросеть YOLO позволяет выполнять классификацию объектов на изображении, детектирование объектов, сегментировать объекты на изображении.

Сегментацию объектов на МИ, полученных по результатам КТ внутренних органов, было решено пока не применять по следующим причинам. Первой являлась большая трудоемкость в получении обучающего датасета – необходима особенно тщательная разметка на изображениях масок правой и левой почек, масок камней, особенно камней сложной кораллоподобной формы. Кроме того, в результате сегментации изображения нейросетью YOLO формируются текстовые файлы с координатами всех точек на изображении, по которым строится маска. Поскольку в исследуемой области объекты почек и камней являются геометрически достаточно сложными, то и маска выделения данных объектов содержит заранее неизвестное число точек, что делает получаемую информацию затруднительной для проведения дальнейших расчетов параметров найденных объектов. Результаты сегментации являются информативно избыточными.

Поэтому для поиска объектов на МИ, полученных в результате процедуры КТ внутренних органов человека при лечении МКБ была выбрана процедура детектирования объектов с помощью YOLO. После детектирования объектов нейросетью данной архитектуры в результате получают изображения, где объекты заданной медицинской патологии (почки, камни) ограничены прямоугольником, также нейросеть формирует текстовый файл к каждому анализируемому МИ с описанием обнаруженных на данном изображении объектов: класс объекта, координаты центра ограничивающего прямоугольника, высоту и ширину данного прямоугольника. С помощью указанных параметров при проведении дальнейших вычислений можно определить линейные размеры объектов. В случае с анализом МИ по результатам КТ после процедуры послышной сборки были получены размеры по осям x , y , z объектов камней, определены распределения плотности найденных камней по осям координат, выполнена трехмерная визуализация объектов почек и камней.

При формировании классов объектов для их использования в системе поддержки принятия врачебных решений в хирургии и урологии с использованием технологий компьютерного зрения специалистами клинического центра имени Святителя Луки были сформулированы задачи поиска конкрементов (камней) в почках на снимках КТ в корональной проекции. Были определены следующие классы объектов: конкременты

(камни) правильной формы – класс «stone»; левая почка правильной формы – класс «left_kidney»; правая почка правильной формы – класс «right_kidney»; патологически увеличенная левая почка – класс «left_kidney_pieloectasy»; патологически увеличенная правая почка – класс «right_kidney_pieloectasy»; большой камень сложной (коралловидной) формы – класс «staghorn_stones».

В процессе проведения исследования была выполнена разметка на изображениях объектов в соответствии с определенными классами, был создан обучающий датасет, включающий 1586 изображений, в том числе 793 оригинальных изображений КТ, полученных из КТ у 21 пациента, 793 обработанных изображений. Обучение проводилось длительностью 1200 эпох.

После обучения была выполнена апробация работы нейросети на МИ, полученных по данным КТ других пациентов (Рисунок 5).

Результаты детектирования МИ, полученных по результатам КТ внутренних органов человека при диагностике МКБ, были предоставлены специалистам клиники для дальнейшего анализа возможности применения данной обученной модели нейросети в системе поддержки принятия медицинских решений в хирургии и урологии.

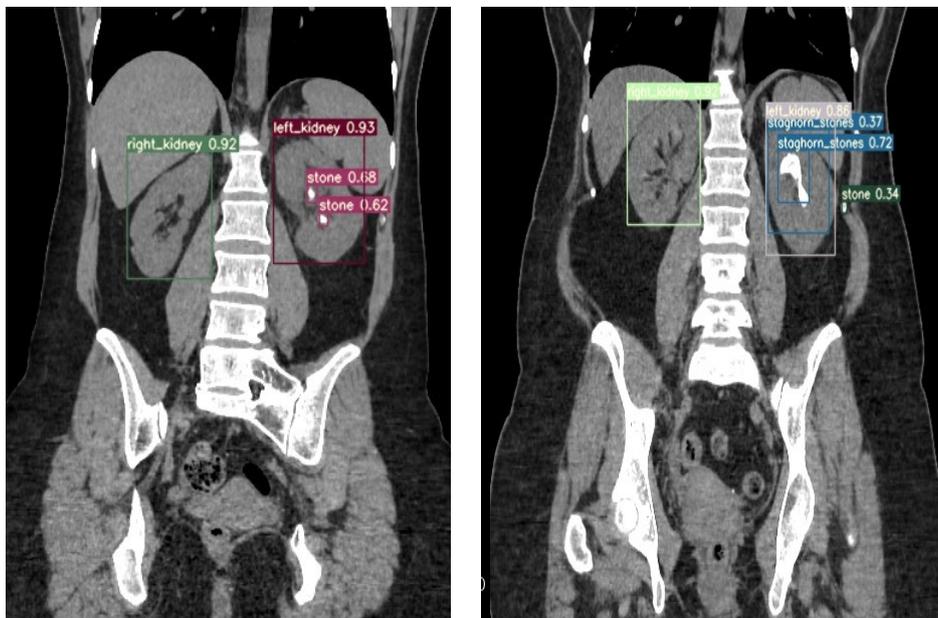


Рисунок 5 – Результаты детектирования объектов нейросетью YOLO на МИ в корональной проекции КТ внутренних органов человека

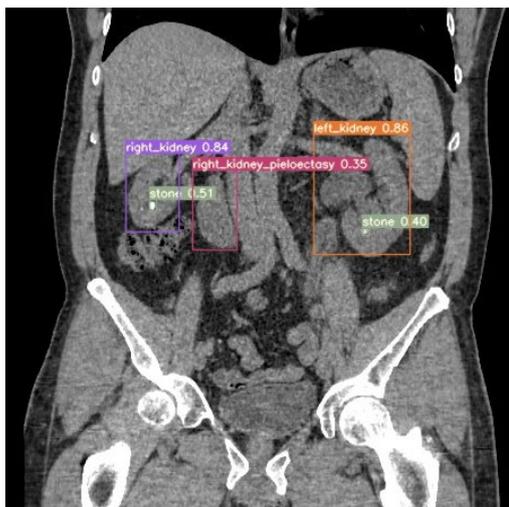
Figure 5 – Results of object detection by the YOLO neural network on MI in the coronal projection of CT scans of human internal organs

Анализ показал наличие ошибок детектирования нейросетью объектов (Рисунок 6). Наиболее частыми были следующие ошибки: объекты почек или камней не детектировались; неправильная локализация объектов почек (Рисунки 6а и 6б); петли кишечника и другие внутренние органы детектировались как почки (Рисунки 6в и 6г); ребра и тазовые кости детектировались как камни (Рисунки 6д и 6е). Указанные ошибки возникли в связи с тем, что нейронная сеть ищет на изображении объекты, совпадающие по форме и виду с изображениями определенного класса, но нейросеть не может оценить, насколько правдоподобен ее вывод. Основной причиной возникновения данных ошибок является отсутствие в алгоритме детектирования нейросети логики оценки локализации и взаимного расположения объектов на снимке внутренних органов человека.

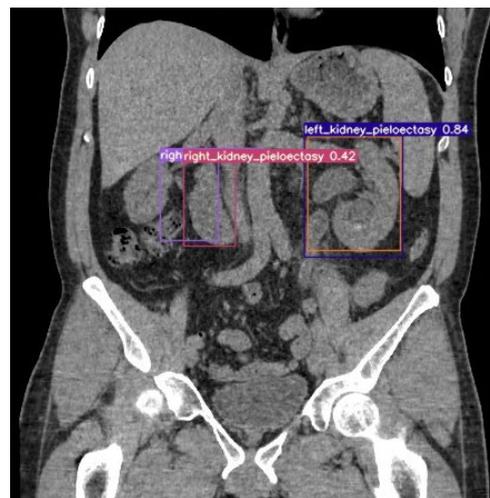
Для улучшения работы процедуры детектирования объектов на МИ, полученных по результатам компьютерной томографии внутренних органов человека, были разработаны математические модели и алгоритм нечеткой оценки результатов детектирования и классификации объектов нейросетью архитектуры YOLO [16, 17]. Модели позволили автоматизировать и сократить время диагностирования заболевания, повысить точность оценки параметров объектов, снизить риски неправильных хирургических решений при планировании и проведении операций.

После внедрения в процедуру детектирования алгоритма и моделей нечеткой оценки результатов детектирования обучающий датасет был расширен до 4272 изображений, полученных в результате КТ 38 пациентов, было выполнено обучение модели YOLOv5m. Обучение проводилось на высокопроизводительном ПК на графическом процессоре с использованием видеокарты Nvidia RTX 3090. Результаты обучения, полученные средствами самой нейросети, приведены на Рисунке 7.

Как видно на графике, данная версия обученной модели архитектуры YOLOv5m показала точность предсказания всех классов объектов 0,995. Вероятность потерь объектов всех классов составила менее 0,005. При проверке точности обучения, выполняемой самой нейросетью в процессе обучения на вариационном датасете, вероятность потерь объектов всех классов составила менее 0,002.



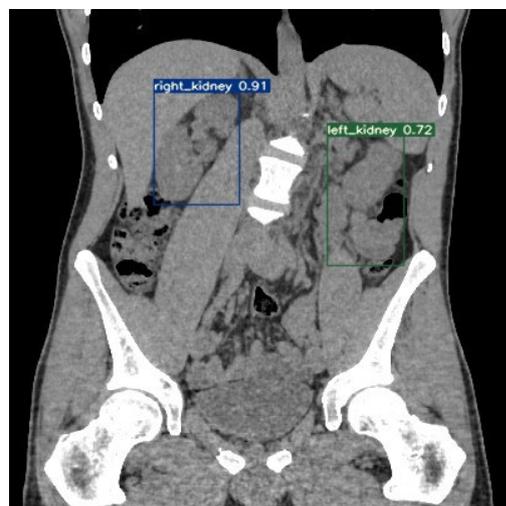
а)



б)



в)



г)

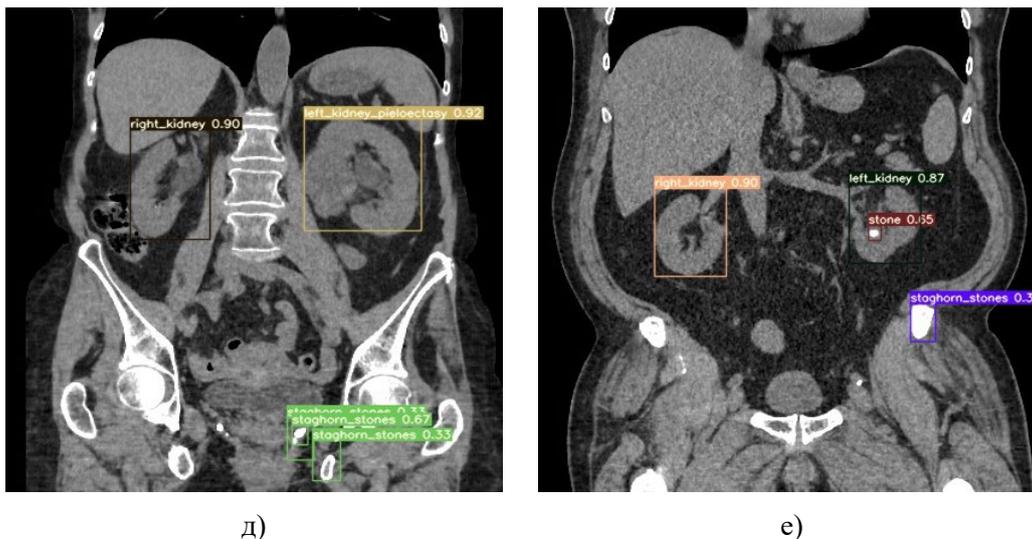


Рисунок 6 – Ошибки детектирования объектов на МИ нейросетью YOLO
Figure 6 – Errors in detecting objects on the YOLO neural network

Таким образом, удалось добиться высокой точности обучения нейросети и избежать ошибок детектирования объектов на медицинских изображениях, полученных по результатам КТ.

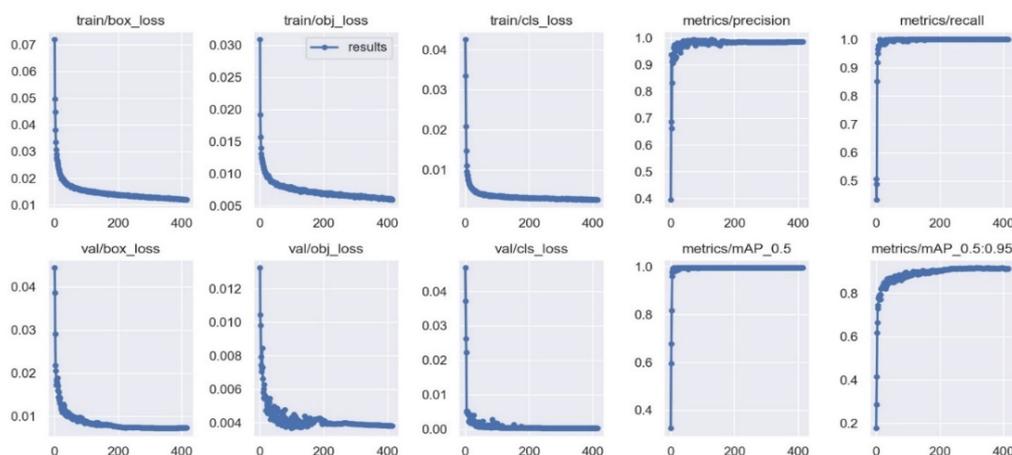


Рисунок 7 – Результаты обучения модели YOLOv5m
Figure 7 – Learning outcomes of the YOLOv5m model

Заключение

В статье исследованы методы анализа медицинских изображений с использованием искусственных нейронных сетей: классификация, детектирование, сегментация. Приведены основные архитектуры искусственных нейронных сетей, применяемых при проектировании систем компьютерного зрения. На основании изученных методов классификации, сегментации и детектирования с применением искусственных нейронных сетей был определен метод анализа медицинских изображений – детектирование и инструмент – сверточная нейронная сеть архитектуры YOLO, имеющая высокие показатели скорости детектирования объектов на изображении, обладающая высоким уровнем точности. Выбранный метод и инструмент позволяют наиболее эффективно обрабатывать и анализировать медицинские изображения и могут быть применены для детектирования объектов на медицинских

изображениях, полученных в результате компьютерной томографии внутренних органов человека в области хирургии и урологии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Мелдо А.А., Уткин Л.В., Трофимова Т.Н. Искусственный интеллект в медицине: современное состояние и основные направления развития интеллектуальной диагностики. *Лучевая диагностика и терапия*. 2020;11(1):9–17. <https://doi.org/10.22328/2079-5343-2020-11-1-9-17>
Meldo A.A., Utkin L.V., Trofimova T.N. Artificial intelligence in medicine: current state and main directions of development of the intellectual diagnostics. *Luhevaya diagnostika i terapiya = Diagnostic radiology and radiotherapy*. 2020;11(1):9–17. (In Russ.). <https://doi.org/10.22328/2079-5343-2020-11-1-9-17>
2. Аббасов И.Б., Дешмух Р.Р. Применение искусственного интеллекта для медицинской визуализации. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2021;(12-1):43–49. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.114.12.005>
Abbasov I.B., Deshmukh R.R. Application of artificial intelligence for medical imaging. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal = International Research Journal*. 2021;(12-1):43–49. (In Russ.). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.114.12.005>
3. Козарь Р.В., Навроцкий А.А., Гуринович А.Б. Методы распознавания медицинских изображений в задачах компьютерной диагностики. *Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины*. 2020;(3):116–121.
Kozar R.V., Naurotsky A.A., Gourinovitch A.B. Recognition methods for medical images in tasks of computer diagnostics. *Izvestiya Gomel'skogo gosudarstvennogo universiteta imeni F. Skoriny = Proceedings of Francisk Scorina Gomel State University*. 2020;(3):116–121. (In Russ.).
4. Huynh Q.T., Nguyen P.H., Le H.X., Ngo L.T., Trinh N.-T., Tran M.T.-T., Nguyen H.T., Vu N.T., Nguyen A.T., Suda K. et al. Automatic Acne Object Detection and Acne Severity Grading Using Smartphone Images and Artificial Intelligence. *Diagnostics*. 2022;12(8). <https://doi.org/10.3390/diagnostics12081879>
5. Бурдин Д.В., Руденко М.А. Интеллектуальная система анализа и оценки медицинских изображений для поддержки принятия врачебных решений. *Наноиндустрия*. 2021;14(S7):821–822. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2021.14.7s.821.822>
Burdin D.V., Rudenko M.A. An Intelligent System for Analyzing and Evaluating Medical Images to Support Medical Decision-making. *Nanoindustriya = Nanoindustry*. 2021;14(S7):821–822. (In Russ.). <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2021.14.7s.821.822>
6. Руденко М.А., Руденко А.В. Нечеткая модель классификации медицинских изображений на основе нейронных сетей. *Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям*. 2021;1:336–339.
Rudenko M.A., Rudenko A.V. Fuzzy model for classification of medical images based on neural networks. *Mezhdunarodnaya konferentsiya po myagkim vychisleniyam i izmereniyam*. 2021;1:336–339. (In Russ.).
7. Руденко М.А., Руденко А.В., Крапивина М.А., Лисовский В.С. Система детектирования и анализа объектов на КТ-снимках в урологии. В сборнике: *III Международная конференция по нейронным сетям и нейротехнологиям (NEURONT'2022), 16 июня 2022 года, Санкт-Петербург, Россия*. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина); 2022. С. 38–42.

- Rudenko M.A., Rudenko A.V., Krapivina M.A., Lisovsky V.S. System for detecting and analyzing objects on CT images in urology. In: *III Mezhdunarodnaya konferentsiya po neironnym setyam i neirotekhnologiyam (NEURONT'2022)*, 16 June 2022, Saint Petersburg, Russia. Saint Petersburg: Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"; 2022. pp. 38–42. (In Russ.).
8. Шубкин Е.О. Обзор методов сегментации медицинских изображений. В сборнике: *Молодежь и современные информационные технологии: Сборник трудов XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 22–26 марта 2021 года, Томск, Россия*. Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет; 2021. С. 90–91.
Shubkin E.O. Obzor metodov segmentatsii meditsinskikh izobrazhenii. In: *Molodezh' i sovremennye informatsionnye tekhnologii: Sbornik trudov XVIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh, 22–26 March 2021, Tomsk, Russia*. Tomsk: National Research Tomsk Polytechnic University; 2021. pp. 90–91. (In Russ.).
 9. Белозеров И.А., Судаков В.А. Исследование моделей машинного обучения для сегментации медицинских изображений. *Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша*. 2022;(37). <https://doi.org/10.20948/prepr-2022-37>
Belozеров I.A., Sudakov V.A. Investigation of machine learning models for medical image segmentation. *Preprinty IPM im. M.V. Keldysha = Keldysh Institute Preprints*. 2022;(37). (In Russ.). <https://doi.org/10.20948/prepr-2022-37>
 10. Maguolo G., Nanni L. A critic evaluation of methods for COVID-19 automatic detection from X-ray images. *Information Fusion*. 2021;76:1–7. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2021.04.008>
 11. Tse Z.T.H., Hovet S., Ren H., Barrett T., Xu S., Turkbey B., Wood B.J. AI-Assisted CT as a Clinical and Research Tool for COVID-19. *Frontiers in Artificial Intelligence*. 2021;4. <https://doi.org/10.3389/frai.2021.590189>
 12. Шагалова П.А., Ерофеева А.Д., Орлова М.М., Чистякова Ю.С., Соколова Э.С. Исследование алгоритмов предобработки изображений для повышения эффективности распознавания медицинских снимков. *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексева*. 2020;(1):25–32. https://doi.org/10.46960/1816-210X_2020_1_25
Shagalova P.A., Erofeeva A.D., Orlova M.M., Chistyakova Yu.S., Sokolova E.S. Research of application of imaging preprocessing algorithms for improving efficiency of recognition of medical pictures. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva = Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*. 2020;(1):25–32. (In Russ.). https://doi.org/10.46960/1816-210X_2020_1_25
 13. Boominathan L., Kruthiventi S.S., BabuvR.V. CrowdNet: A Deep Convolutional Network for Dense Crowd Counting. In: *MM '16: ACM Multimedia Conference: Proceedings of the 24th ACM international conference on Multimedia, 15–19 October 2016, Amsterdam, The Netherlands*. New York: Association for Computing Machinery; 2016. pp. 640–644. <https://doi.org/10.1145/2964284.2967300>
 14. Wang C.-Y., Yeh I.-H., Liao H.-Y.M. YOLOv9: Learning What You Want to Learn Using Programmable Gradient Information. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.13616> [Accessed 12th June 2024].
 15. Пранович А.А., Исмаилов А.К., Карельская Н.А., Костин А.А., Кармазановский Г.Г., Грицкевич А.А. Искусственный интеллект в диагностике и лечении мочекаменной болезни. *Российский журнал телемедицины и электронного здравоохранения*. 2022;8(1):42–57. <https://doi.org/10.29188/2712-9217-2022-8-1-42-57>

- Pranovich A.A., Ismailov A.K., Karelskaya N.A., Kostin A.A., Karmazanovsky G.G., Gritskevich A.A. Artificial intelligence in the diagnosis and treatment of kidney stone disease. *Rossiiskii zhurnal telemeditsiny i elektronnoho zdravookhraneniya = Russian Journal of Telemedicine and E-Health*. 2022;8(1):42–57. (In Russ.). <https://doi.org/10.29188/2712-9217-2022-8-1-42-57>
16. Руденко А.В., Руденко М.А., Каширина И.Л. Метод оценки результатов детектирования и классификации объектов на медицинских изображениях. *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии*. 2024;(1):137–148. <https://doi.org/10.17308/sait/1995-5499/2024/1/137-148>
Rudenko A.V., Rudenko M.A., Kashirina I.L. Mechanism for evaluating the results of detection and classification of objects in medical images. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemnyi analiz i informatsionnye tekhnologii = Proceedings of Voronezh State University. Series: Systems Analysis and Information Technologies*. 2024;(1):137–148. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sait/1995-5499/2024/1/137-148>
17. Руденко А.В., Руденко М.А., Каширина И.Л. Алгоритмы 3D-реконструкции и расчета параметров объектов по результатам детектирования на медицинских изображениях. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2024;12(2). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1594>
Rudenko A.V., Rudenko M.A., Kashirina I.L. Algorithms for 3D reconstruction and calculation of object parameters based on the results of detection in medical images. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii = Modeling, Optimization and Information Technology*. 2024;12(2). (In Russ.). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1594>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Руденко Андрей Владимирович, Andrei V. Rudenko, assistant of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, the Russian Federation.
преподаватель Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского, Симферополь, Российская Федерация.
e-mail: rudenkoandre@mail.ru
ORCID: [0009-0004-6297-2742](https://orcid.org/0009-0004-6297-2742)

Руденко Марина Анатольевна, Marina A. Rudenko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Computer Engineering and Modeling of the Institute of Physics and Technology of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, the Russian Federation.
технических наук, доцент кафедры компьютерной инженерии и моделирования Физико-технического института Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского, Симферополь, Российская Федерация.
e-mail: rudenko.ma@cfuv.ru
ORCID: [0000-0002-8334-8453](https://orcid.org/0000-0002-8334-8453)

Каширина Ирина Леонидовна, Irina L. Kashirina, Doctor of Technical Sciences, Professor, Mathematical Methods of Operations Research Department, Voronezh state university, Voronezh, the Russian Federation.
технических наук, профессор, кафедра математических методов исследования операций, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация.
e-mail: kash.irina@mail.ru

ORCID: [0000-0002-8664-9817](https://orcid.org/0000-0002-8664-9817)

*Статья поступила в редакцию 14.07.2024; одобрена после рецензирования 22.07.2024;
принята к публикации 30.07.2024.*

*The article was submitted 14.07.2024; approved after reviewing 22.07.2024;
accepted for publication 30.07.2024.*