

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ЗАДАЧЕ ПОПИКСЕЛЬНОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ПАТОЛОГИЙ В КОЛОНОСКОПИИ

**В. В. Хрящев¹, А. Л. Приоров²,
Н. В. Котов³, К. И. Малыгин⁴**

^{1, 2, 3, 4} Ярославский государственный университет
им. П. Г. Демидова, Ярославль, Россия
¹ v.khryashchev@uniyar.ac.ru, ² pri@uniyar.ac.ru,
³ nik-kotov-98@inbox.ru, ⁴ maliginkirill@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* На современном этапе развития систем высокотехнологичной медицины колоноскопическое исследование является наиболее эффективным способом ранней диагностики колоректального рака. Наиболее типичной аномалией, приводящей к высокому риску возникновения онкологических заболеваний, является появление и развитие колоректальных полипов – новообразований размером в несколько миллиметров. Их обнаружение во время колоноскопического исследования представляет собой исключительно важную задачу для врача-эндоскописта. Целью работы является дальнейшее совершенствование алгоритмов автоматического обнаружения полипов с использованием методов цифровой обработки изображений для использования их в системах поддержки принятия врачебного решения реального времени. *Материалы и методы.* Проведено исследование эффективности использования ряда классических и нейросетевых алгоритмов сегментации изображений. Для обучения и тестирования алгоритмов глубокого машинного обучения использовались стандартная открытая база изображений полипов Kvasir-SEG, а также собственная база изображений, полученная и размеченная в эндоскопическом отделении Ярославской областной клинической онкологической больницы. *Результаты.* Показано достижение существенного превосходства нейросетевых алгоритмов сегментации над классическими подходами и алгоритмами. По метрике коэффициента Дайса наилучший результат показывает нейросетевая архитектура Meta-Polyr, достигающая значения коэффициента в 0,933 при использовании комбинированной базы тестовых изображений полипов. *Выводы.* Рассмотренные алгоритмы будут служить основой для разработки программно-аппаратного комплекса с алгоритмическим модулем обнаружения патологий на колоноскопических изображениях.

Ключевые слова: цифровая обработка изображений, детектирование объектов, сегментация объектов, нейронные сети, машинное обучение, колоноскопия, колоректальные полипы

Для цитирования: Хрящев В. В., Приоров А. Л., Котов Н. В., Малыгин К. И. Использование алгоритмов цифровой обработки изображений в задаче попиксельного детектирования патологий в колоноскопии // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2024. № 4. С. 86–97. doi: 10.21685/2227-8486-2024-4-7

USING DIGITAL IMAGE PROCESSING ALGORITHMS IN THE TASK OF PIXEL-BY-PIXEL DETECTION OF PATHOLOGIES IN COLONOSCOPY

V.V. Khryashchev¹, A.L. Priorov², N.V. Kotov³, K.I. Malygin⁴

^{1, 2, 3, 4} P.G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia

¹ v.khryashchev@uniyar.ac.ru, ² pri@uniyar.ac.ru,

³ nik-kotov-98@inbox.ru, ⁴ maliginkirill@yandex.ru

Abstract. *Background.* At the current stage of high-tech medicine systems development, colonoscopy is the most effective way of early diagnosis of colorectal cancer. The most typical anomaly leading to a high risk of cancer is the appearance and development of colorectal polyps – neoplasms several millimeters in size. Their detection during a colonoscopic examination is an extremely important task for an endoscopist. The aim of the work is to further improve the algorithms for automatic detection of polyps using digital image processing methods for their use in real-time medical decision support systems. *Materials and methods.* A study was conducted to evaluate the efficiency of using a number of classical and neural network image segmentation algorithms. For training and testing deep machine learning algorithms, a standard open database of polyp images – Kvasir-SEG, as well as our own database of images obtained and labeled in the endoscopic department of the Yaroslavl Regional Clinical Oncology Hospital, were used. *Results.* A significant superiority of neural network segmentation algorithms over classical approaches and algorithms was demonstrated. According to the Dice coefficient metric, the best result was shown by the Meta-Polyp neural network architecture, reaching a coefficient value of 0.933 when using a combined database of test polyp images. *Conclusions.* The considered algorithms will serve as the basis for developing a hardware and software complex with an algorithmic module for detecting pathologies in colonoscopic images.

Keywords: digital image processing, object detection, object segmentation, neural networks, machine learning, colonoscopy, colorectal polyps

For citation: Khryashchev V.V., Priorov A.L., Kotov N.V., Malygin K.I. Using digital image processing algorithms in the task of pixel-by-pixel detection of pathologies in colonoscopy. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2024;(4):86–97. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2024-4-7

Введение

Медицина всегда являлась областью, где широко применялись современные информационные технологии. Это относится и к визуальным технологиям, которые уже много лет успешно используются как в медицинской диагностике, так и при лечении различных заболеваний. Примерами могут служить алгоритмы цифровой обработки изображений, используемые при анализе рентгеновских снимков, а также данных, полученных с устройств магнитно-резонансной и компьютерной томографии. Несколько позднее визуальные системы стали использовать совместно с системами искусственного интеллекта (ИИ), что значительно расширило возможности врачей по ранней диагностике заболеваний и их своевременному и эффективному лечению. Совместное использование систем машинного зрения и ИИ помогает обнаруживать такие аномалии, которые в отдельных случаях сложно заметить даже

опытному врачу, что в итоге приводит к более быстрой и точной диагностике многих опасных заболеваний [1–3].

Важным направлением внедрения систем ИИ является эндоскопия. Получаемые при эндоскопическом обследовании видеофрагменты и отдельные изображения обрабатываются с использованием методов глубокого машинного обучения с целью обнаружения соответствующих объектов интереса (опухоли различной природы, полипы, аденомы и др.) и их последующей классификации.

В настоящее время колоректальный рак является одним из самых распространенных онкологических заболеваний. Колоноскопия – ключевой метод диагностики, позволяющий обнаружить как злокачественные, так и доброкачественные образования в толстом кишечнике. Современные технологии, такие как узкоспектральная и увеличительная эндоскопия, значительно улучшают выявление рака на ранних стадиях. Установлено, что регулярная колоноскопия и своевременное удаление полипов после нее могут предотвратить до 90 % случаев колоректального рака [4, 5].

Однако даже при тщательных обследованиях врачи-эндоскописты пропускают полипы. Установлено, что порядка 20 % полипов не выявляется. Для повышения точности подобной диагностики разрабатываются автоматизированные системы обнаружения полипов. В частности, современные нейросетевые алгоритмы сегментации могут заметно улучшить качество диагностики и хирургических процедур [6–8].

Одним из наиболее часто используемых подходов является попиксельное детектирование (сегментация). При этом изображение разбивается на области, представляющие различные классы объектов, в рамках данной прикладной области интереса это полипы и фон. Существующие подходы можно условно разделить на классические методы и методы с использованием нейронных сетей [9, 10]. Установлено, что первые чаще всего уступают вторым, показывающим более высокие точность и эффективность в целом ряде практических медицинских приложений.

Целью работы является исследование классических и нейросетевых алгоритмов сегментации колоректальных полипов на изображениях эндоскопического обследования, учитывая ограниченность доступных баз данных и необходимость в экспертной аннотации изображений. Данный материал является продолжением работ группы авторов и фокусируется на более сложной задаче попиксельного детектирования области нахождения полипа на видеокадре колоноскопического исследования.

Базы изображений полипов

Для проведения сравнительного анализа между различными исследованиями алгоритмов детектирования и сегментации полипов на колоноскопических изображениях критически важным является наличие открыто распространяемой и экспертно размеченной базы изображений. Наибольшее распространение в данной сфере получила база изображений Kvasir-SEG, содержащая 1000 экспертно размеченных кадров сохраненных видеоданных исследований толстой кишки [11, 12]. В ней содержатся изображения 1072 полипов, при этом их размер в пикселях варьируется от нескольких десятков

до нескольких сотен. В ней также хранятся экспертные бинарные шаблоны (маски), соответствующие областям попиксельного выделения области полипов, как показано на рис. 1.

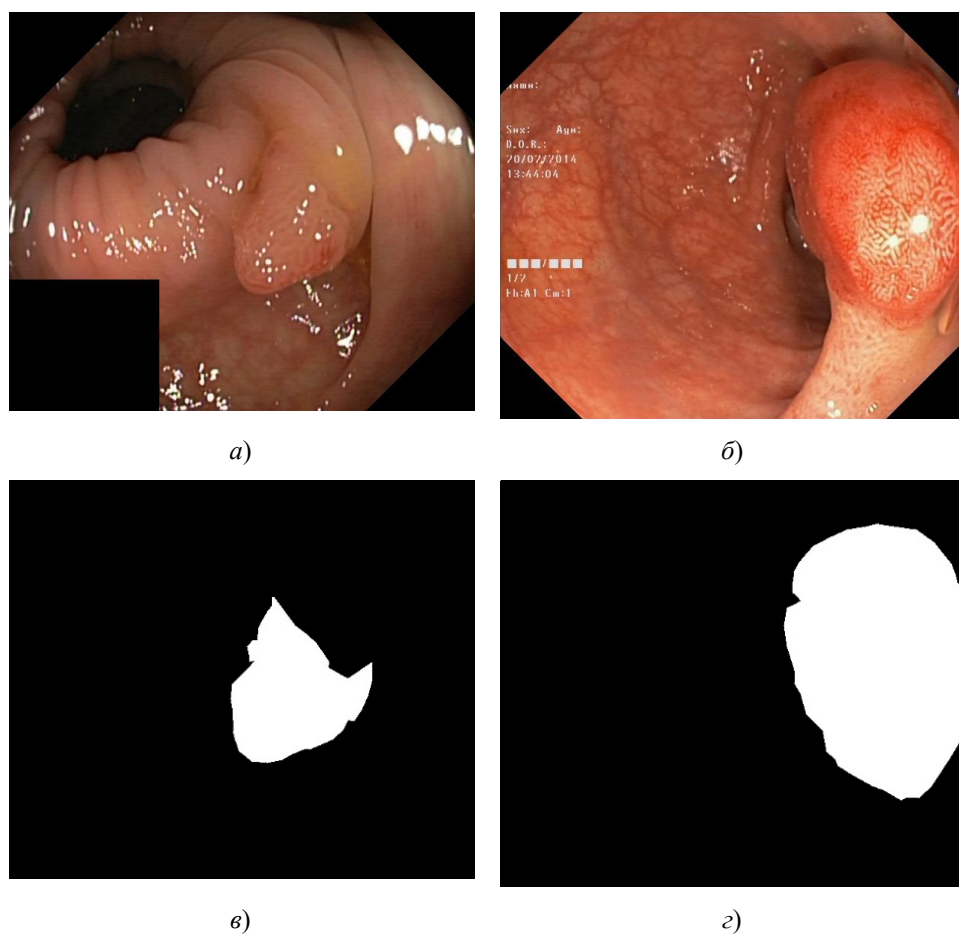


Рис. 1. Полипы: *а, б* – примеры кадров колоноскопического исследования; *в, г* – соответствующие им бинарные шаблоны из базы Kvasir-SEG

Из анализа современной научно-технической литературы известно, что базу изображений Kvasir-SEG можно использовать для решения задач детектирования (обнаружения), а также задач сегментации (кластеризации) полипов. К сожалению, для многих практических задач по обучению современных моделей нейронных сетей, в том числе и сетей глубокого обучения, ее объем не является достаточным, поэтому возникает необходимость в создании дополнительных баз изображений полипов, используемых для обучения и тестирования современных нейросетевых моделей.

В ходе работы кроме базы изображений Kvasir-SEG использовалась также база из 206 медицинских изображений с полипами и соответствующими шаблонами попиксельного выделения области полипов. Видеокадры колоноскопических исследований взяты из данных, предоставленных эндоскопическим отделением Ярославской областной клинической онкологической больницы. Разрешение изображений составляло 626×532 пикселя.

Данный набор изображений является расширением базы OnkoYar-SEG, описанной в работе [7]. Ручное экспертное выделение области полипа на изображении осуществлялось с помощью открытого программного обеспечения labelme [13]. Процесс выделения показан на рис. 2. Файл с разметкой хранится в формате JSON.

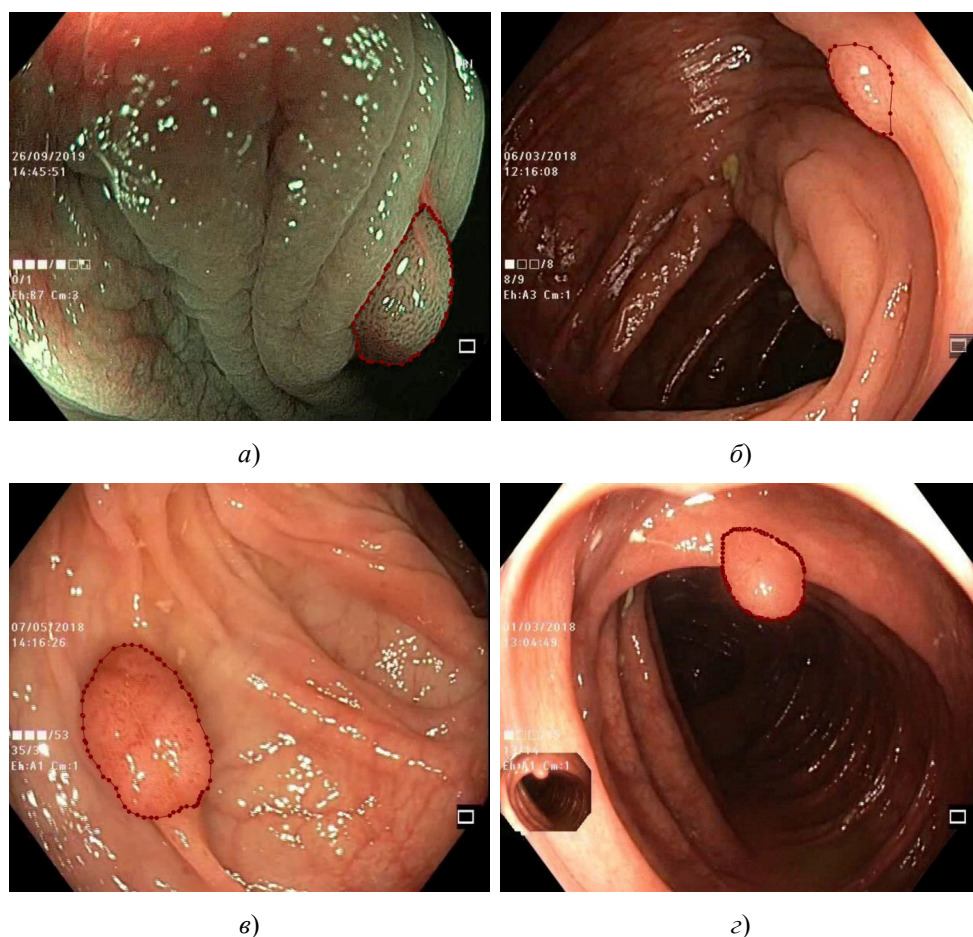


Рис. 2. Примеры размеченных изображений из базы OnkoYar-SEG

Исследование классических методов сегментации

Одним из наиболее известных классических алгоритмов сегментации является метод кластеризации *k-means* [14]. Он минимизирует суммарное квадратичное отклонение точек, принадлежащих кластерам, от их центроидов. Метод *k-means* делит множество пикселей изображений на k кластеров, стремясь к тому, чтобы точки внутри кластера были максимально близки к его центроиду. Процесс кластеризации осуществляется путем итеративного перемещения центроидов до достижения их стабилизации.

Исследования по практическому применению метода *k-means* при разных значениях числа кластеров k показали его низкую эффективность при работе с реальными колоноскопическими изображениями. Визуальные результаты приведены на рис. 3.

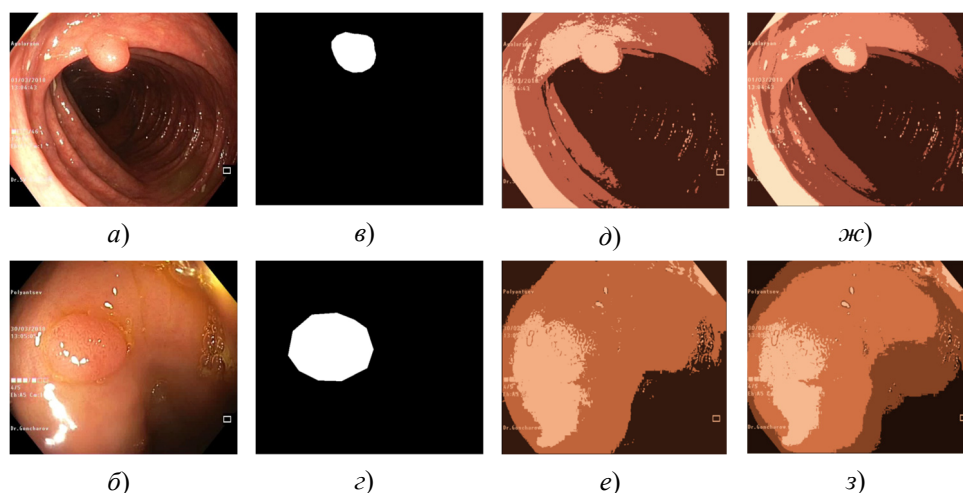


Рис. 3. Результаты работы алгоритма на базе метода *k-means*:

а, б – кадры колоноскопического исследования; *в, г* – бинарные шаблоны;
д, е – результаты сегментации при $k = 3$; *ж, з* – результаты сегментации при $k = 4$

Другим популярным классическим методом сегментации является метод Оцу (Otsu), основанный на анализе гистограммы интенсивности пикселей изображения [15]. Гистограмма представляет собой графическое отображение распределения интенсивностей пикселей, где ось абсцисс соответствует значениям интенсивности в диапазоне $[0, 255]$, а ось ординат – количеству пикселей для каждой интенсивности. Метод Оцу представляет пороговое значение на гистограмме, разделяющее все пиксели на два класса. Для этого минимизируется внутриклассовая дисперсия, это означает, что пиксели внутри каждого класса должны быть максимально однородными. Таким образом, пороговое значение обеспечивает максимально возможное разделение классов по яркости, что способствует наиболее четкому выделению фона и объекта интереса.

Однако при практическом применении данного алгоритма к задаче сегментации полипов на колоноскопических изображениях результаты также оказываются неудовлетворительными (рис. 4).

На основании результатов сегментации полипов с использованием классических методов можно констатировать их недостаточную эффективность в решении данной задачи. Это обусловлено следующими основными факторами:

1. Медицинские изображения характеризуются наличием различных шумов, что существенно затрудняет работу классических алгоритмов сегментации, которые демонстрируют высокую чувствительность к подобным артефактам.

2. Классические методы сегментации не принимают во внимание пространственные и контекстуальные особенности изображений, в то время как при анализе сложных изображений важно учитывать форму и границы объектов, а также их взаиморасположение в контексте общего изображения.

3. Традиционные алгоритмы опираются на цветовую информацию изображений, однако полипы могут обладать цветом и текстурой, схожей с окружающими их обычными тканями толстой кишки, что приводит к некорректной сегментации.

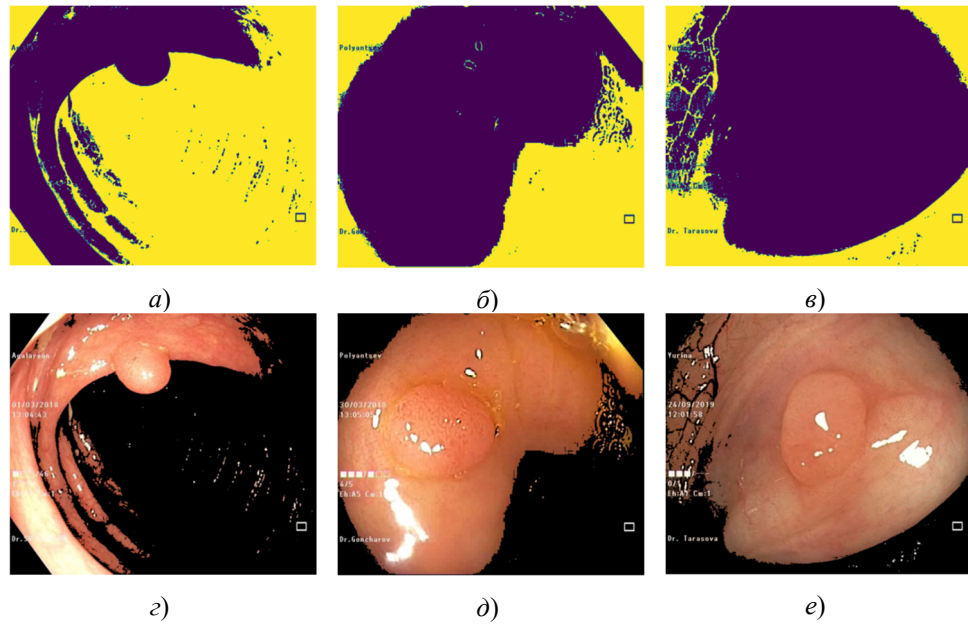


Рис. 4. Примеры сегментации полипов методом Оцу:
а–в – полученные этим методом маски;
г–е – результаты наложения масок на исходные изображения

Исследование нейросетевых алгоритмов сегментации

В ходе исследования проведено обучение и тестирование нейросетевых алгоритмов на базе следующих архитектур: SSformer-S, SSformer-L, U-Net, U-Net++, DUCK-Net-17, DUCK-Net-34, Meta-Polyp [16–21]. Для обучения и тестирования использовались ранее описанные базы изображений Kvasir-SEG и OnkoYar-SEG, содержащие полипы толстой кишки, изображения которых делились на обучающую, валидационную и тестовую выборки в стандартной пропорции.

Параметры обучения, которые использовались в проведенных программных экспериментах, имели следующий вид: функция потерь – BCE, оптимизатор – Adam (параметры $\beta_1 = 0,9$; $\beta_2 = 0,999$; $\varepsilon = 10^{-8}$), число эпох обучения – 200; постоянная скорость обучения – 0,001. Важно отметить, что судить о возможности использования полученных результатов для оценки эффективности рассматриваемых нейросетевых архитектур помогает фиксация указанных гиперпараметров.

Для сравнения качества работы алгоритмов сегментации использовался коэффициент Дайса (Dice) [22], принимающий значения от 0 до 1 и определяемый как отношение двойного размера пересечения множеств (например, A и B) к их сумме:

$$Dice = \frac{2|A \cap B|}{|A| + |B|} = \frac{2TP}{2TP + FP + FN},$$

здесь A – предсказанное алгоритмом множество пикселей; B – множество пикселей эталонной маски; $|A \cap B|$ – количество элементов, которое присутствует в обоих множествах; TP (true positive) – истинно положительный результат,

т.е. количество правильно обнаруженных пикселей; FP (false positive) – ложноположительный результат, т.е. количество пикселей, определенных алгоритмом ошибочно (приняты им за объект патологии); FN (false negative) – ложноотрицательный результат – количество пикселей, относящихся к объектам интереса (хотя алгоритм их к ним не отнес).

Архитектура нейронной сети Meta-Polyp, показавшей наилучшие результаты тестирования, представлена на рис. 5,а. Вход сети имеет размерность $X \in R^{Width \times Height \times 3}$, $X \in R^{\frac{W}{2^{i+1}} \times \frac{H}{2^{i+1}} \times F_i}$, где $F_i \in \{64; 128; 320; 512\}; i \in \{1; 2; 3; 4\}$ – фильтр на шаге i -го этапа кодера и декодера. На этапе декодера признак декодируется дважды. Затем он объединяется с признаком на $i+2$ -м шаге для улучшения и повышения частоты дискретизации. Декодер генерирует маску и преобразует карту признаков в 1-й фильтр. Блок «Конформер» состоит из нескольких блоков, показанных на рис. 5,б.

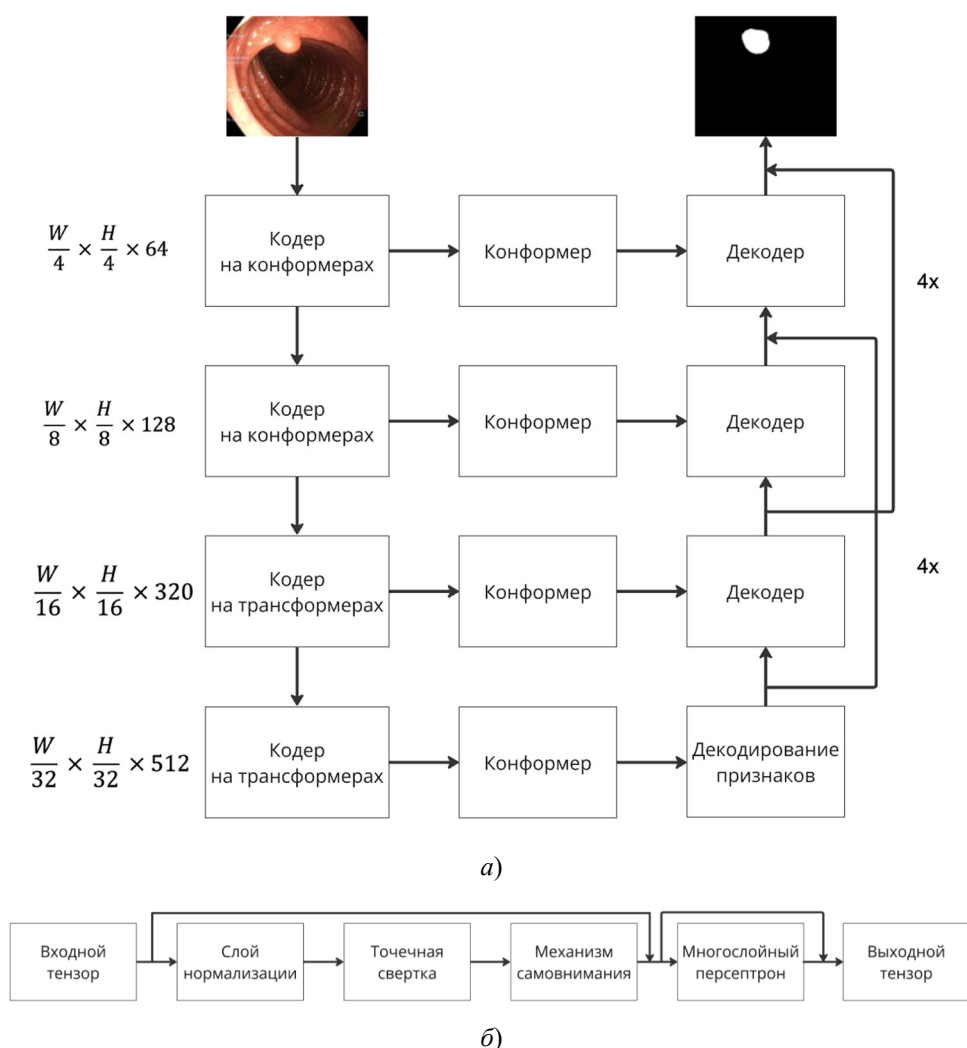


Рис. 5. Архитектура нейронной сети Meta-Polyp:
а – общая схема сети; б – схема блока «Конформер»

Результаты тестирования нейросетевых алгоритмов по метрике Дайса для двух рассматриваемых наборов изображений приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения коэффициента Дайса

Набор данных	Нейросетевая архитектура						
	SSformer-S	SSformer-L	U-Net	U-Net++	DUCK-Net-17	DUCK-Net-34	Meta-Polyp
Kvasir-SEG	0,960	0,939	0,812	0,810	0,891	0,907	0,952
OnkoYar-SEG	0,882	0,892	0,715	0,702	0,711	0,757	0,855
OnkoYar-SEG + Kvasir-SEG	0,908	0,907	0,759	0,751	0,805	0,833	0,933

Наилучшие результаты на наборе Kvasir-SEG достигнуты с применением архитектуры SSformer-S, которая продемонстрировала коэффициент Дайса 0,96, а наихудшие – с использованием архитектуры U-Net++, где этот коэффициент составил всего 0,81.

Дополнительно проведены тесты на собственной базе данных из 206 изображений OnkoYar-SEG. Здесь наилучший результат достигнут с использованием архитектуры SSformer-L с коэффициентом Дайса 0,892, а наихудший снова получен с использованием архитектуры U-Net++, с коэффициентом Дайса 0,702.

Проведены тесты на объединенной базе данных, включающей 206 изображений из базы OnkoYar-SEG и 100 изображений из базы Kvasir-SEG. Здесь наилучший результат достигнут с использованием архитектуры Meta-Polyp с коэффициентом Дайса 0,933, а наихудший – вновь при использовании архитектуры U-Net++, где коэффициент Дайса составил 0,751.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что архитектуры SSformer-S и SSformer-L, а также Meta-Polyp эффективно справляются с задачей сегментации полипов. Они демонстрируют высокую точность в определении границ и контуров полипов, превосходя классическую для задач сегментации объектов на изображениях архитектуру U-Net на 19–27 % по коэффициенту Дайса.

Заключение

Рассмотрено решение задачи сегментации полипов на изображениях, полученных при колоноскопических обследованиях как классическими методами (*k-means* и Оцу), так и методами на основе современных нейросетевых архитектур. Результаты тестирования показали, что классические алгоритмы дают неудовлетворительный практический результат.

Нейросетевые алгоритмы показывают, что при обучении их на базах с размерностью порядка 1000 изображений, они дают хорошие результаты сегментации. Среди них выделяются архитектуры SSformer, а также Meta-Polyp. Дополнительное тестирование на собственной базе изображений полипов OnkoYar-SEG показывает снижение качества работы нейросетевых алгоритмов по метрике коэффициента Дайса на 5–10 %.

Рассмотренные алгоритмы будут служить основой для разработки программно-аппаратного комплекса с алгоритмическим модулем обнаружения патологий на колоноскопических изображениях.

Список литературы

1. Карпов О. Э., Храмов А. Е. Информационные технологии, вычислительные системы и искусственный интеллект в медицине. М. : ДПК Пресс, 2022. 480 с.
2. Клетте Р. Компьютерное зрение. Теория и алгоритмы / пер. с англ. А. А. Слинкин. М. : ДМК Пресс, 2019. 506 с.
3. Rangayyan R. M. Biomedical Image Analysis. Boca Raton : CRC Press, 2005. 1306 p.
4. Кашин С. В., Нехайкова Н. В., Завьялов Д. В. [и др.]. Скрининг колоректального рака: общая ситуация в мире и рекомендованные стандарты качества колоноскопии // Доказательная гастроэнтерология. 2017. С. 32–52.
5. Никонов Е. Л., Аксенов В. А., Кашин С. В., Нехайкова Н. В. Международный опыт скрининга колоректального рака // Доказательная гастроэнтерология. 2017. Т. 6, № 3. С. 30–35.
6. Хрящев В. В. Анализ видеоизображений для контроля соблюдения стандартов качества в колоноскопии // Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике : сб. ст. XXIII Междунар. науч.-техн. конф. Пенза : Изд-во ПГУ, 2023. С. 182–186.
7. Хрящев В. В. Сегментация изображений полипов при колоноскопическом исследовании с использованием нейронных сетей // Биомедицинская радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 4. С. 66–72.
8. Хрящев В. В., Приоров А. Л., Лебедев А. А., Котов Н. А. Обнаружение полипов на колоноскопических изображениях при помощи алгоритмов на базе нейросетевой архитектуры YOLO // Цифровая обработка сигналов. 2023. № 3. С. 27–31.
9. Приоров А. Л., Хрящев В. В., Топников А. И. Обработка и передача мультимедийной информации : учеб. пособие. Ярославль : ЯрГУ, 2022. 248 с.
10. Бабаян П. В., Муравьев В. С., Смирнов С. А., Стротов В. В. Обработка изображений в системах обнаружения и сопровождения объектов. Классические методы : учеб. пособие для вузов. М. : Горячая линия – Телеком, 2024. 168 с.
11. Jha D., Smedsrud P., Riegler M. [et al.]. Kvasir-seg: A Segmented Polyp Dataset // Proc. of International Conference on Multimedia Modeling. 2020. P. 451–462.
12. Jha D., Ali S., Tomar N. K. [et al.]. Real-Time Polyp Detection, Localization and Segmentation in Colonoscopy Using Deep Learning // Computer Vision and Pattern Recognition. 2021. P. 40496–40510.
13. Image Polygonal Annotation with Python // LabelMe. URL: <https://github.com/wkentaro/labelme> (дата обращения: 10.07.2024).
14. Ahmed M., Seraj R., Islam S. M. S. The k-means algorithm: A comprehensive survey and performance evaluation // Electronics. 2020. Т. 9, № 8. P. 1295.
15. Liu D., Yu J. Otsu method and K-means // Ninth International conference on hybrid intelligent systems // Ninth International Conference on Hybrid Intelligent Systems. 2009. Vol. 1. P. 344–349.
16. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation // Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015. Lecture Notes in Computer Science. 2015. Vol. 9351. P. 234–241.
17. Zhou Z., Siddiquee M., Tajbakhsh N., Liang J. UNet++: A Nested U-Net Architecture for Medical Image Segmentation. 2018.
18. Jha D., Smedsrud P., Riegler M. [et al.]. ResUNet++: An Advanced Architecture for Medical Image Segmentation // 21st IEEE International Symposium on Multimedia. 2019.
19. Shi W., Xu J., Gao P. SSformer: A Lightweight Transformer for Semantic Segmentation. 2022.
20. Dumitru R. G., Peteleaza D., Craciun C. Using DUCK-Net for polyp image segmentation // Scientific reports. 2023. Т. 13, № 1. P. 9803.
21. Trinh Q. H. Meta-Polyp: a baseline for efficient Polyp segmentation // IEEE 36th International Symposium on Computer-Based Medical Systems (CBMS). 2023. P. 742–747.

22. Carass A., Roy S., Gherman A. [et al.]. Evaluating White Matter Lesion Segmentations with Refined Sørensen-Dice Analysis // *Sci Rep*. 2020. Vol. 10 (1). P. 8242. doi: 10.1038/s41598-020-64803

References

1. Karpov O.E., Khramov A.E. *Informatsionnye tekhnologii, vychislitel'nye sistemy i iskusstvennyy intellekt v meditsine = Information technologies, computing systems and artificial intelligence in medicine*. Moscow: DPK Press, 2022:480. (In Russ.)
2. Klette R. *Komp'yuternoe zrenie. Teoriya i algoritmy / per. s angl. A. A. Slinkin = Computer vision. Theory and Algorithms / translated from English by A. A. Slinkin*. Moscow: DMK Press, 2019:506. (In Russ.)
3. Rangayyan R.M. *Biomedical Image Analysis*. Boca Raton: CRC Press, 2005:1306.
4. Kashin S.V., Nekhaykova N.V., Zav'yalov D.V. et al. Colorectal cancer screening: the general situation in the world and recommended colonoscopy quality standards. *Dokazatel'naya gastroenterologiya = Evidence-based gastroenterology*. 2017:32–52. (In Russ.)
5. Nikonov E.L., Aksenov V.A., Kashin S.V., Nekhaykova N.V. International experience in colorectal cancer screening. *Dokazatel'naya gastroenterologiya = Evidence-based gastroenterology*. 2017;6(3):30–35. (In Russ.)
6. Khryashchev V.V. Analysis of video images for monitoring compliance with quality standards in colonoscopy. *Problemy informatiki v obrazovanii, upravlenii, ekonomike i tekhnike: sb. st. XXIII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. = Problems of computer science in education, management, economics and technology : collection of Articles XXIII International scientific and technical conf.* Penza: Izd-vo PGU, 2023:182–186. (In Russ.)
7. Khryashchev V.V. Segmentation of images of polyps during colonoscopic examination using neural networks. *Biomeditsinskaya radioelektronika = Biomedical radio electronics*. 2023;26(4):66–72. (In Russ.)
8. Khryashchev V.V., Priorov A.L., Lebedev A.A., Kotov N.A. Detection of polyps on colonoscopic images using algorithms based on the YOLO neural network architecture. *Tsifrovaya obrabotka signalov = Digital signal processing*. 2023;(3):27–31. (In Russ.)
9. Priorov A.L., Khryashchev V.V., Topnikov A.I. *Obrabotka i peredacha mul'timediynoy informatsii: ucheb. posobie = Processing and transmission of multimedia information : a textbook*. Yaroslavl': YarGU, 2022:248. (In Russ.)
10. Babayan P.V., Murav'ev V.S., Smirnov S.A., Strotov V.V. *Obrabotka izobrazheniy v sistemakh obnaruzheniya i soprovozhdeniya ob"ektov. Klassicheskie metody: ucheb. posobie dlya vuzov = Image processing in object detection and tracking systems. Classical methods : a textbook for universities*. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2024:168. (In Russ.)
11. Jha D., Smedsrud P., Riegler M. et al. Kvasir-seg: A Segmented Polyp Dataset. *Proc. of International Conference on Multimedia Modeling*. 2020:451–462.
12. Jha D., Ali S., Tomar N.K. et al. Real-Time Polyp Detection, Localization and Segmentation in Colonoscopy Using Deep Learning. *Computer Vision and Pattern Recognition*. 2021:40496–40510.
13. Image Polygonal Annotation with Python. *LabelMe*. Available at: <https://github.com/wkentaro/labelme> (accessed 10.07.2024).
14. Ahmed M., Seraj R., Islam S.M.S. The k-means algorithm: A comprehensive survey and performance evaluation. *Electronics*. 2020;9(8):1295.
15. Liu D., Yu J. Otsu method and K-means. Ninth International conference on hybrid intelligent systems. *Ninth International Conference on Hybrid Intelligent Systems*. 2009;1:344–349.
16. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015. Lecture Notes in Computer Science*. 2015;9351:234–241.

17. Zhou Z., Siddiquee M., Tajbakhsh N., Liang J. *UNet++: A Nested U-Net Architecture for Medical Image Segmentation*. 2018.
18. Jha D., Smedsrud P., Riegler M. et al. ResUNet++: An Advanced Architecture for Medical Image Segmentation. *21st IEEE International Symposium on Multimedia*. 2019.
19. Shi W., Xu J., Gao P. *SSformer: A Lightweight Transformer for Semantic Segmentation*. 2022.
20. Dumitru R.G., Peteleaza D., Craciun C. Using DUCK-Net for polyp image segmentation. *Scientific reports*. 2023;13(1):9803.
21. Trinh Q.H. Meta-Polyp: a baseline for efficient Polyp segmentation. *IEEE 36th International Symposium on Computer-Based Medical Systems (CBMS)*. 2023:742–747.
22. Carass A., Roy S., Gherman A. et al. Evaluating White Matter Lesion Segmentations with Refined Sørensen-Dice Analysis. *Sci Rep*. 2020;10(1):8242. doi: 10.1038/s41598-020-64803

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Вячеславович Хрящев

кандидат технических наук,
доцент кафедры цифровых технологий
и машинного обучения,
Ярославский государственный
университет им. П. Г. Демидова
(Россия, г. Ярославль, ул. Советская, 14/2)
E-mail: v.khryashchev@uniyar.ac.ru

Vladimir V. Khryashchev

Candidate of technical sciences, associate
professor of the sub-department of digital
technologies and machine learning,
P.G. Demidov Yaroslavl State University
(14/2 Sovetskaya street, Yaroslavl, Russia)

Андрей Леонидович Приоров

доктор технических наук, профессор
кафедры цифровых технологий
и машинного обучения,
Ярославский государственный
университет им. П. Г. Демидова
(Россия, г. Ярославль, ул. Советская, 14/2)
E-mail: v.khryashchev@uniyar.ac.ru

Andrey L. Priorov

Doctor of technical sciences, professor
of the sub-department of digital
technologies and machine learning,
P.G. Demidov Yaroslavl State University
(14/2 Sovetskaya street, Yaroslavl, Russia)

Никита Валерьевич Котов

аспирант,
Ярославский государственный
университет им. П. Г. Демидова
(Россия, г. Ярославль, ул. Советская, 14/2)
E-mail: nik-kotov-98@inbox.ru

Nikita V. Kotov

Postgraduate student,
P.G. Demidov Yaroslavl State University
(14/2 Sovetskaya street, Yaroslavl, Russia)

Кирилл Игоревич Малыгин

магистрант,
Ярославский государственный
университет им. П. Г. Демидова
(Россия, г. Ярославль, ул. Советская, 14/2)
E-mail: maliginkirill@yandex.ru

Kirill I. Malygin

Master degree student,
P.G. Demidov Yaroslavl State University
(14/2 Sovetskaya street, Yaroslavl, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 14.10.2024

Поступила после рецензирования/Revised 13.12.2024

Принята к публикации/Accepted 17.12.2024