

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-99-114>



УДК 04.93'1; 004.932

Методика диагностики глаукомы по снимкам глазного дна человека

С. В. Комкова¹ ✉

¹ Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета имени А. Г. и Н. Г. Столетовых ул. Орловская, д. 23, Владимирская область, г. Муром 602264, Российская Федерация

✉ e-mail: savicheva-svetlana2010@yandex.ru

Резюме

Цель исследования – разработка методики обнаружения глаукомы, которая основана на вычислении величины соотношения размеров оптической чашки и оптического диска и правиле четырех квадрантов. Их использование повышает точность обнаружения глаукомы на изображениях сетчатки глаза человека.

Методы. Предложена методика обнаружения глаукомы, которая использует отношение вертикального диаметра чашки к вертикальному диаметру диска и правило «четырёх квадрантов» в качестве двух основных параметров для обнаружения глаукомы. Диск зрительного нерва (ОД), глазная чашка (ОЧ) сегментируются с использованием метода наращивания областей и метода водоразделов, а затем объединяются для получения окончательных результатов. Их объединение выполняется с помощью логической операции ИЛИ. Полученные изображения аппроксимируются с применением круговой аппроксимации, поскольку ее реализация проста за счет вычисления одного центра и радиуса. Для диагностики было решено применять два параметра – соотношение чашки и диска (ОЧД) и правило четырех квадрантов. Их комбинированная оценка позволяет увеличить точность обнаружения глаукомы.

Результаты. Исследование предложенной методики было произведено на снимках сетчатки глаза, полученных из 4 баз данных: HRF, DIARETDB1, DRIONS-DB, Messidor. Исследование показало, что предложенная методика правильно определяет 75 изображений сетчатки как глаукомные из 84с общей чувствительностью 91,67%. Из 163 нормальных изображений 154 были правильно классифицированы как нормальные со специфичностью 94,47%.

Заключение. Предлагаемая методика проста и вычислительно эффективна. Она может быть использована в компьютерной диагностике глаукомы на ранних стадиях заболевания.

Ключевые слова: глаукома; слепота; оптическая чашка; оптический диск; наращивание областей; метод водораздела.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Комкова С. В. Методика диагностики глаукомы по снимкам глазного дна человека // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 4. С. 99–114. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-99-114>.

Поступила в редакцию 11.10.2023

Подписана в печать 09.11.2023

Опубликована 22.12.2023

© Комкова С. В., 2023

Method of Diagnosis of Glaucoma Based on Human Fundus Images

Svetlana V. Komkova¹✉

¹ Murom Institute (Branch) Vladimir State University named after A. G. and N. G. Stoletov
23 Orlovskaya Str., Vladimir Region, Murom 602264, Russian Federation

✉ e-mail: savicheva-svetlana2010@yandex.ru

Abstract

The purpose of the research to develop a technique for detecting glaucoma, which is based on calculating the size ratio of the optical cup and optical disc and the "four quadrants" rule. Their use increases the accuracy of glaucoma detection in human retina images.

Methods. A glaucoma detection technique is proposed that uses the ratio of the vertical diameter of the cup to the vertical diameter of the disc and the "four quadrants" rule as the two main parameters for the detection of glaucoma. The optic nerve disc (OD), the ocular cup (OCH) are segmented using the area extension method and the watershed method, and then combined to obtain the final results. Their union is performed using the logical operation OR. The resulting images are approximated using circular approximation, since its implementation is simple by calculating a single center and radius. For diagnostics, it was decided to use two parameters: the ratio of the cup and the disc (OCD) and the rule of "four quadrants". Their combined assessment makes it possible to increase the accuracy of glaucoma detection.

Results: the study of the proposed technique was performed on retinal images obtained from 4 databases: HRF, DIARETDB1, DRIONS-DB, Messidor. The study showed that the proposed technique correctly identifies 75 retinal images as glaucoma out of 84 with a total sensitivity of 91.67%. Of the 163 normal images, 154 were correctly classified as normal with a specificity of 94.47%.

Conclusion. The proposed method is simple and computationally efficient. It can be effectively used in computer diagnostics of glaucoma in the early stages of the disease.

Keywords: glaucoma; blindness; optical cup; optical disc; area extension; watershed method.

Conflict of interest: The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Komkova S. V. Method of Diagnosis of Glaucoma Based on Human Fundus Images. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2023; 13(4): 99–114. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-99-114>.

Received 11.10.2023

Accepted 09.11.2023

Published 22.12.2023

Введение

В настоящее время второй ведущей причиной слепоты в мире является глаукома. Она представляет собой заболевание глаза, вызывающее повреждение зрительного нерва. По мере прогресси-

рования болезни происходит постепенная потеря зрения, которая продолжается в течение длительного периода времени [1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9]. Данное заболевание называется «тихим похитителем зрения», так как очень часто

пациент не подозревает о заболевании, пока оно не достигнет запущенной стадии. Глаукома неизлечима, однако при правильном лечении ее развитие можно остановить. Поэтому раннее выявление глаукомы играет незаменимую роль в диагностике глазных заболеваний [10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 17].

На рисунке 1 приведено изображение сетчатки, на котором расположены: оптический диск (ОД), оптическая чаша (ОЧ) и нейроретинальный край (НК).

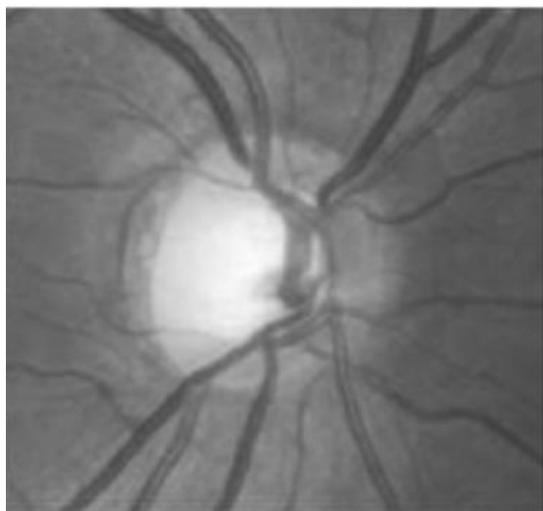


Рис. 1. Изображение сетчатки глаза

Fig. 1. Retina image

ОД служит точкой входа и выхода из глаза. Через него проходят центральная артерия и вена сетчатки. Нормальный ОД имеет оранжево-розовый цвет, но выглядит бледным при наличии патологий. ОЧ представляет собой чашеобразную структуру, расположенную в центре ОД. Это центральная выемка в головке зрительного нерва, лишенная нервных волокон. Нейроретинальный край (НК) лежит между краем ОД и ОЧ. Форма НК изменяется при патологиях

ОД. Внутриглазная жидкость, присутствующая в глазу, оказывает давление на глаз, тем самым изменяя внутриглазное давление (ВГД). В случае глаукомы дренажная система блокируется, и это приводит к повышению ВГД и повреждению волокон зрительного нерва. По мере того как интенсивность повреждения увеличивается, ОД начинает впадать и приобретает чашевидную форму. ОД медленно расширяется по мере прогрессирования заболевания, что приводит к постепенной потере зрения.

Увеличение размеров ОД и истончение НК можно рассматривать как две основные характеристики глаукомного изображения. Увеличение площади чашечки служит индикатором глаукомы и измеряется отношением чашки к диску (ЧД). Значение ЧД невелико для нормального ОД, в то время как оно велико для дисков при глаукоме. Нейроретинальный край можно разделить на четыре квадранта: нижний (1), верхний (2), носовой (3) и височный (4). У здорового глаза нижний (1) ободок обычно толще верхнего (2), который толще, чем носовой (3) ободок, а височный (4) ободок является самым тонким. Таким образом, для оценки глаукомы соотношение чашечек и дисков (ЧД) и правило четырех квадрантов являются двумя наиболее широко используемыми параметрами для диагностики глаукомы. Именно поэтому точная сегментация ОД и ОЧ играет жизненно важную роль в точной оценке заболевания.

Материалы и методы

Предлагаемая методика диагностики исследует входные изображения

сетчатки глаза на наличие глаукомы [18; 19; 20].

Рассмотрим этапы данной методики (рис. 2).

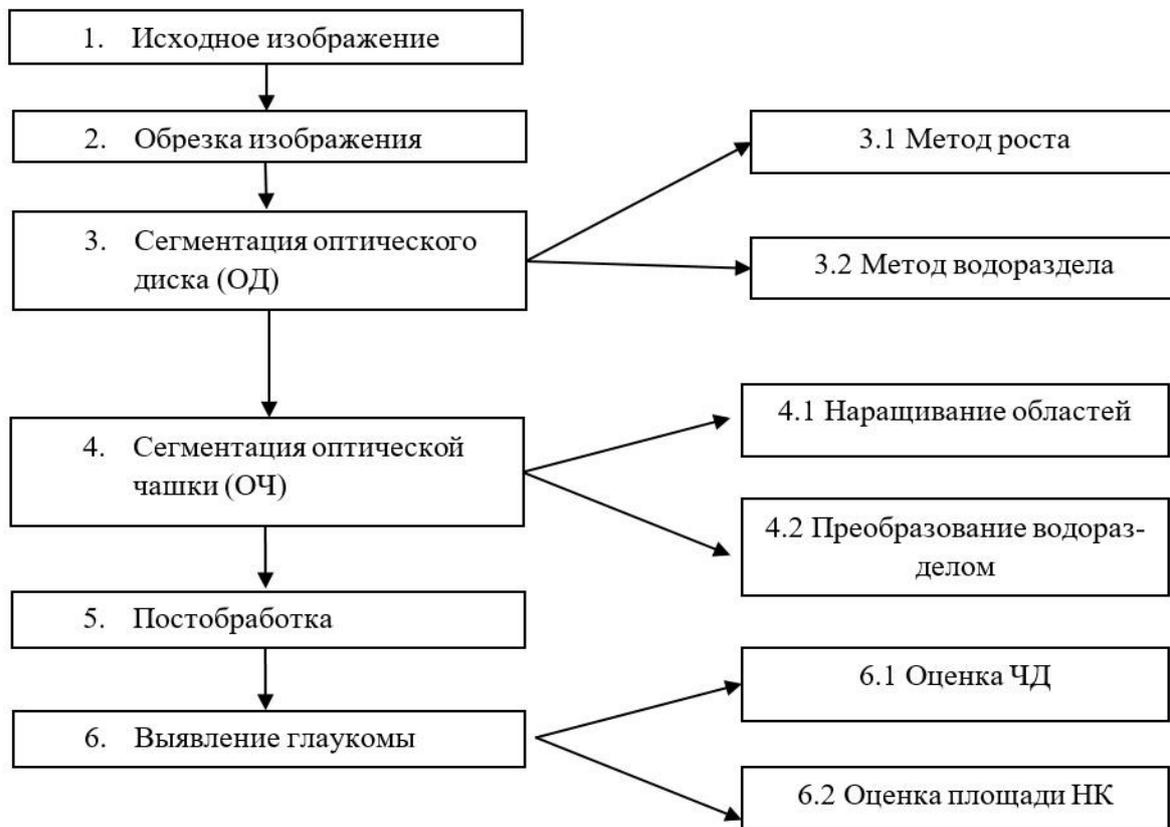


Рис. 2. Общая схема методики

Fig. 2. General scheme of the methodology

• **Этап 1.** Сегментация оптического диска (ОД). Исследование показало, что ОД выглядит ярким и однородным в красном канале, поэтому для каждого изображения извлекается красный канал цветового пространства RGB (рис. 3, б). Помимо этого, изображения сетчатки страдают от неравномерного освещения, что приводит к эффекту затемнения. Данный эффект возникает из-за присутствия низкочастотного шума. Его можно удалить с помощью медианного фильтра (рис. 3, в). Область ОД перекрыта

кровеносными сосудами, что затрудняет его сегментацию и дальнейшую обработку. Для удаления кровеносных сосудов используется операция морфологического открытия в серой шкале. Структурирующий элемент (СЭ) выбирается таким образом, чтобы удалялись только кровеносные сосуды. Объекты, которые слишком малы, чтобы содержать СЭ, удаляются с помощью операции морфологического открытия. При этом количество удаленных кровеносных сосудов зависит от размера СЭ. Если размер СЭ

слишком мал, то будут удалены только тонкие кровеносные сосуды и это приведет к меньшей сегментированной области ОД. Если же размер СЭ окажется слишком велик, то более крупные сосуды будут удалены вместе с некоторой областью вокруг ОД и это приведет к большей сегментированной области ОД в результате процедуры сегментации, чем фактическая область ОД. Экспериментально

было установлено, что для получения хороших результатов сегментации необходимо применение СЭ в форме диска радиусом 34 (рис. 3, з). После удаления кровеносных сосудов ОД сегментируется одновременно с использованием метода наращивания областей и трансформации водораздела (рис. 3, д). Окончательный результат получается путем объединения результатов двух методов.

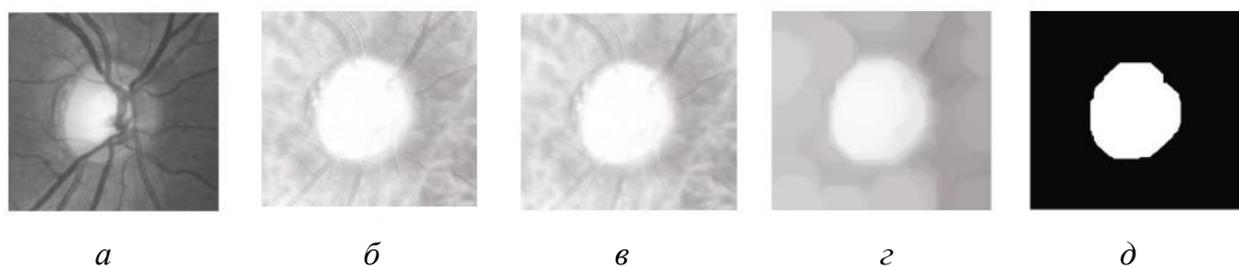


Рис. 3. Сегментация оптического диска: *а* – исходное изображение; *б* – извлечение красного канала цветового пространства RGB; *в* – медианная фильтрация; *г* – удаление кровеносных сосудов; *д* – окончательная сегментация

Fig. 3. Segmentation of the optical disc: *a* – the original image; *b* – extraction of the red channel of the RGB color space; *в* – median filtration; *г* – removal of blood vessels; *д* – final segmentation

1.1. Сегментация ОД с использованием метода наращивания областей. Оптический диск является самой яркой деталью на изображении сетчатки глаза (рис. 3, *а*). Следовательно, можно отметить приблизительную область ОД, если найти на изображении область с максимальной яркостью. Любой пиксель в этой области может быть использован в качестве начальной точки, и эта точка будет использована для запуска процесса наращивания региона. Для добавления соседних пикселей к начальной точке применяется порог. Если интенсивность посевной точки равна S , то к начальной точке добавляется пиксель

при условии, что $|S - N| \leq T$, где N – яркость пикселя, а T указывает порог. Из данного выражения следует, что пиксель добавляется к исходной точке, если абсолютная разница между яркостью исходной точки и яркостью текущих пикселей равна или ниже порогового значения T . Если порог T выбрать минимальный, то меньшее количество пикселей будет добавлено к начальной точке и это приведет к результату сегментации, в котором сегментированная область ОД меньше, чем фактическая область ОД. Если же порог T выбрать максимальным, то это приведет к противоположной ситуации и сегментированная область

окажется больше, чем фактическая область ОД. Исходя из этого были проведены эксперименты, которые показали, что значение порога $T = 25$ дает наилучшие результаты сегментации в большинстве случаев (рис. 3, д).

1.2. Сегментация ОД с использованием преобразования водораздела. Данный метод находит региональные минимумы на изображении и интерпретирует их как объекты, подлежащие сегментации, после чего формирует линии гребней водораздела вокруг этих объектов.

Под региональным минимумом понимается связанная группа пикселей с постоянным значением яркости. Для того чтобы сделать ОД региональным минимумом, необходимо из полученного изображения сделать градиентное. Подобное изображение можно получить, если применить оператор Собеля (рис. 4, а).

Градиентное изображение изменяется с помощью маркеров. Внутренние маркеры соответствуют области ОД, а

внешние маркеры – это границы объектов, соответствующие региональным минимумам и имеющие большие значения яркости. Пороговое значение T в данном случае установим по формуле

$$T = \min(I(x, y)) + I,$$

где $\min(I(x, y))$ дает минимальное значение яркости, чтобы выделить только те региональные минимумы, которые представляют интерес. Все минимумы на изображении, глубина которых меньше или равна пороговому значению T , выделяются белым в результирующем изображении (рис. 4, б). Внешний маркер представляет собой круг постоянного диаметра с центром в центре тяжести изображения. Его размер зависит от размера изображения. Исследования показывают, что ОД составляет около 50% площади обрезанного изображения глазного дна. Таким образом, размер круга должен превышать 50% от размера изображения (рис. 4, в). Итоговый результат приведен на (рис. 4, г).

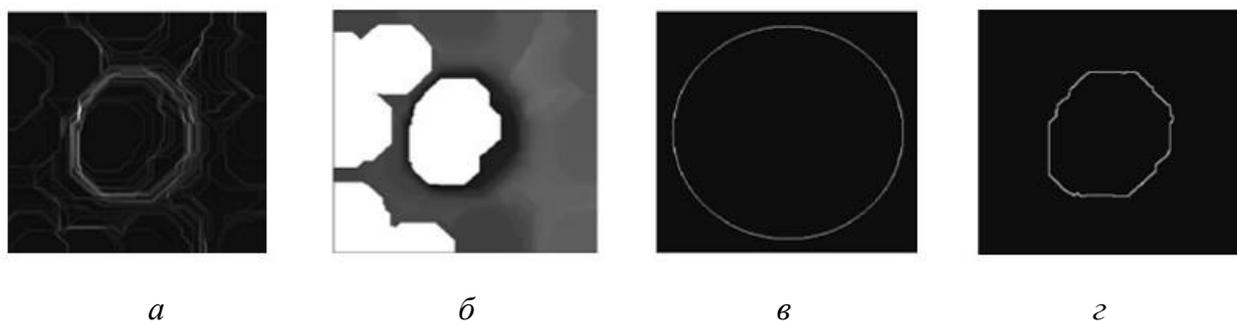


Рис. 4. Сегментация оптического диска: а – применение оператора Собеля; б – выделение пикселей черным и белом цветом; в – прорисовка круга; г – окончательная сегментация

Fig. 4. Segmentation of the optical disk: а – using the Sobel operator; б – highlighting pixels in black and white; в – drawing a circle; г – final segmentation

• **Этап 2.** Сегментация оптической чашки (ОЧ). Сегментация ОЧ значительно сложнее, чем сегментация ОД, из-за высокой плотности кровеносных сосудов, охватывающих границу чашки. Иногда нечеткая граница между ОЧ и ОД затрудняет их различие. Информация о цвете области чашки может использоваться для обнаружения ОЧ. Было установлено, что область чашки выглядит однородной и хорошо контрастирующей на фоне в плоскости «а» цветового пространства Lab.

К исходному изображению в данной плоскости применяется медианная фильтрация с целью удаления компонент с низким уровнем шума. После этого выполняется операция морфологического открытия для удаления

мешающих кровеносных сосудов. Порядок удаления аналогичен удалению, описанному в этапе 1. Экспериментально установлено, что СЭ в форме диска с радиусом 13 дает наилучшие результаты. Обработанное изображение подвергается одновременно двум методам сегментации, аналогичным 1 этапу, а их результаты объединяются.

2.1. Сегментация ОЧ с использованием метода наращивания областей. Порядок сегментации ОЧ аналогичен сегментации ОД. Как и в случае ОД, пороговое значение T , которое будет использоваться для наращивания области, устанавливается экспериментально, и его значение равно 25. Результат сегментации приведен ниже (рис. 5).

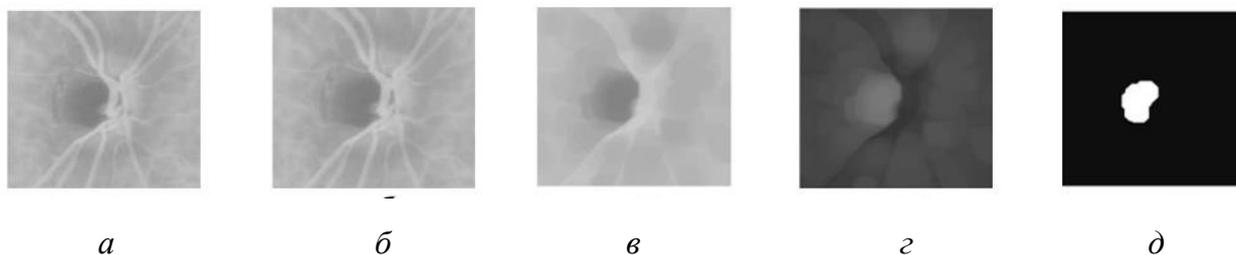


Рис. 5. Этапы проведения сегментации оптической чашки методом наращивания областей: а – выделение однородной области ОЧ в цветовом пространстве Lab; б – результат применения медианной фильтрации к анализируемому изображению; в – результат применения операции морфологического открытия для удаления кровеносных сосудов; г – результат применения структурообразующего элемента в форме диска радиуса 13; д – результирующее сегментированное изображение

Fig. 5. Steps for Optical Cup Segmentation by Area Expansion: а – isolating a uniform region of OC in the Lab color space; б – the result of applying median filtering to the analyzed image; в – the result of using a morphological opening operation to remove blood vessels; г – the result of using a structure-forming element in the form of a disk with a radius of 13; д – the resulting segmented image

2.2. Сегментация ОД с использованием преобразования водораздела. Данный метод аналогичен методу, описанному в 1.2. Разница только в размере

диаметра круга. Его размер составляет примерно 25% от размера изображения. Результат показан ниже (рис. 6).

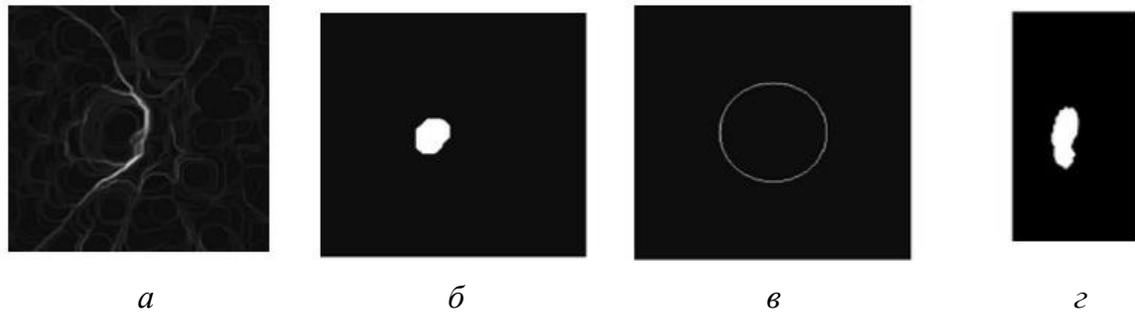


Рис. 6. Этапы проведения сегментации изображения оптической чашки с использованием преобразования водораздела: *а* – исходное изображение; *б* – этап подбора возможного радиуса структурообразующего элемента; *в* – промежуточный вариант выбора структурообразующего элемента; *г* – обработка изображения структурообразующим элементом круг, радиус которого составляет примерно 25% от размера изображения

Fig. 6. Steps for segmenting an optical cup image using a watershed transformation: *a* – initial image; *б* – the step of selecting the possible radius of the structure-forming element; *в* – an intermediate option for selecting a structure-forming element; *г* – image processing by structure-forming element circle, radius of which is approximately 25% of image size

• **Этап 3.** Постобработка. Сегментированные ОД и ОЧ, полученные на этапах 1 и 2 (рис. 7, *а*, *б*), соответственно объединяются для получения

окончательных результатов (рис. 7, *в*). Их объединение выполняется с помощью логической операции ИЛИ.

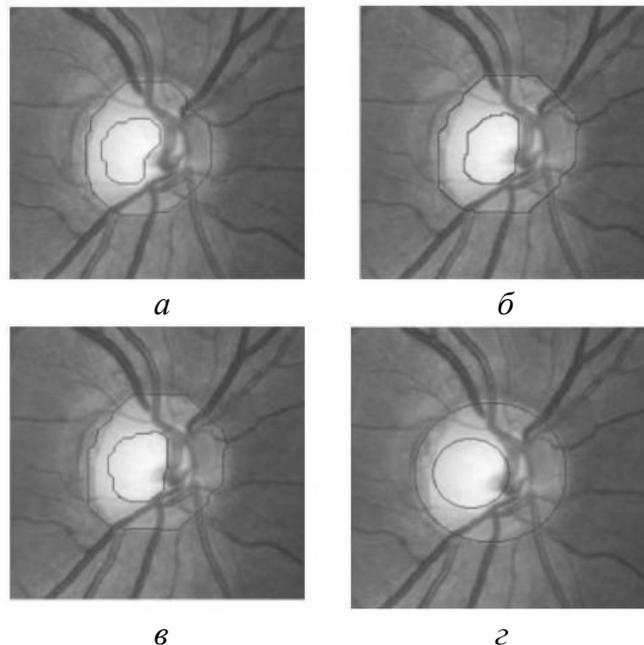


Рис. 7. Результаты окончательной обработки: *а* – сегментированное изображение оптического диска; *б* – сегментированное изображение оптической чашки; *в* – объединение изображений для получения окончательных результатов; *г* – окончательные аппроксимированные результаты

Fig. 7. Final Processing Results: *a* – a segmented image of the optical disc; *б* – segmented image of an optical cup; *в* – combining images to obtain final results; *г* – final approximated results.

Полученные изображения аппроксимируются с применением круговой аппроксимации, поскольку ее реализация проста за счет вычисления одного центра и радиуса. Центр для реализации круга можно легко определить, найдя центр тяжести сегментированного ОД и ОЧ, тогда как радиус можно оценить, вычислив половину ширины ОД и ОЧ в горизонтальном или вертикальном направлении в зависимости от того, что больше. Окончательные аппроксимированные ОД и ОЧ показаны на рисунке 7, з.

• **Этап 4.** Выявление глаукомы. Для диагностики было решено применять два параметра – соотношение чашки и диска (ОЧД) и правило четырех

квадрантов. Их комбинированная оценка позволяет увеличить точность обнаружения глаукомы.

4.1. Оценка ОЧД. При глаукоме площадь чашки увеличивается медленно, что приводит к постепенной потере зрения. Увеличение площади чашки исследуют путем оценки значения ОЧД. Клинически ОЧД определяется как отношение вертикального диаметра чашки (ВДЧ) к вертикальному диаметру диска (ВДД) (рис. 8, а). Значение ОЧД рассчитывается по формуле

$$\text{ОЧД} = \frac{1 \text{ ВДЧ}}{4 \text{ ВДД}}$$

Значение ОЧД меньше 0,5 для нормального ОД, тогда как оно превышает 0,5 в случае глаукомного диска.

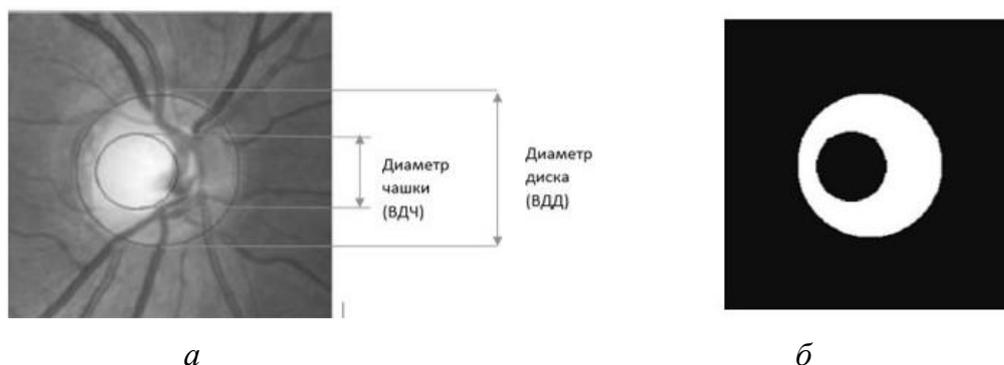


Рис. 8. Оценка ОЧД: а – исходное изображение сетчатки; б – сегментированное изображение

Fig. 8. Evaluation of the OCD: а – original retinal image; б – segmented image

4.2. Оценка площади НК в четырех квадрантах. Область НК играет важную роль в анализе глаукомы. Согласно правилу четырех квадрантов, для нормального ОД область НК лежит в следующем порядке: 1) нижняя; 2) верхняя; 3) височная; 4) область носа.

Глаукома вызывает повреждение верхних и нижних нервных волокон до

височных и носовых волокон. Это приводит к истончению верхнего и нижнего краев и, следовательно, нарушению правила четырех квадрантов.

Область НК (рис. 8, б) извлекается путем выполнения операций XOR над двоичными сегментированными изображениями ОД и ОЧ.

Результаты и их обсуждение

Исследования предложенной методики проводились по 4 общедоступным базам: HRF, DIARETDB1, DRIONS-DB, Messidor. Изображения, полученные из различных источников, классифицируются на нормальные или глаукомные. В таблице 1 представлены результаты оценки 10 изображений, взятых выборочно из представленных баз. Для каждого изображения были вычислены ОЧД и соответствие правилу четырех квадрантов.

Оценка была проведена путем вычисления значений точности, чувстви-

тельности и специфичности по следующим формулам [20]:

$$\text{Точность} = \frac{(TP+TN)}{(TP+TN+FP+FN)},$$

$$\text{Чувствительность} = \frac{TP}{(TP+FN)},$$

$$\text{Специфичность} = \frac{TN}{(TN+FP)},$$

где TP – количество глаукомных изображений, классифицированных как глаукомные; FN – количество изображений глаукомы, классифицированных как нормальные; TN – это количество нормальных изображений, классифицированных как нормальные; FP – это количество нормальных изображений, классифицированных как глаукомные.

Таблица 1. Результаты расчетов

Table 1. Calculation results

Номер изображения	ОЧД по предлагаемой методике	Соответствие правилу четырех квадрантов	Вывод
1	0,4321	Соответствует	Нормальное
2	0,6231	Не соответствует	Глаукома
3	0,3102	Соответствует	Нормальное
4	0,6981	Не соответствует	Глаукома
5	0,4125	Соответствует	Нормальное
6	0,3124	Соответствует	Нормальное
7	0,3845	Соответствует	Нормальное
8	0,4887	Соответствует	Нормальное
9	0,5123	Не соответствует	Глаукома
10	0,6134	Не соответствует	Глаукома

В таблицах 2 и 3 приведены результаты разработанной методики для изображений, взятых из разных баз. Исследование показало, что предложенная методика правильно определяет 75 изображений сетчатки как глаукомные из 84с

общей чувствительностью 91,67%. Из 163 нормальных изображений 154 были правильно классифицированы как нормальные со специфичностью 94,47%.

Таблица 2. Результаты обнаружения глаукомы**Table 2.** Glaucoma detection results

База изображений	Количество изображений с глаукомой	Количество правильно обнаруженных	Чувствительность, %
HRF	15	13	86,67
DIARETDB1	16	14	87,5
DRIONS-DB	25	24	96
Messidor	28	26	92,85
Всего	84	77	91,67

Таблица 3. Результаты обнаружения нормальных изображений**Table 3.** Results of normal image detection

База изображений	Количество нормальных изображений	Количество правильно обнаруженных	Специфичность, %
HRF	15	14	93,33
DIARETDB1	46	44	95,65
DRIONS-DB	36	33	91,66
Messidor	66	63	95,45
Всего	163	154	94,47

На некоторых изображениях предложенной методикой были допущены ошибки классификации. Это может быть по двум причинам:

1) на оптическом диске были кроме глаукомы другие патологии, которые мешали выполнить правильный анализ;

2) входное изображение сетчатки имеет низкую контрастность – такую, что граница между ОЧ и ОД невозможно различить.

Выводы

Глаукома – это тяжелое заболевание, приводящее к слепоте. Своевременное обнаружение глаукомы может остановить дальнейшее прогрессирование

заболевания. Однако диагностика глаукомы основана на трудоемких ручных наблюдениях. Следовательно, развитие компьютерных методов обнаружения может помочь офтальмологам в своевременной и рентабельной диагностике заболевания. В данной статье предложена методика обнаружения глаукомы. Она использует отношение вертикального диаметра чашки к вертикальному диаметру диска и правило четырех квадрантов в качестве двух основных параметров для обнаружения глаукомы. ОД и ОЧ сегментируются с применением двух разных алгоритмов, а затем объединяются для получения окончательных результатов.

Исследование предложенной методики было произведено на снимках сетчатки глаза, полученным из 4 баз данных: HRF, DIARETDB1, DRIONS-DB, Messidor. Чувствительность методики –

91,67%. Она проста с точки зрения вычислений, а следовательно, может быть использована в качестве полезного инструмента в приложениях для скрининга глаукомы.

Список литературы

1. Abdel-Razik Youssif A., Ghalwash A., Abdel-Rahman Ghoneim A. Optic disc detection from normalized digital fundus images by means of a vessels' direction matched filter // *Medical Imaging*. 2018. Vol. 27, N 1. P. 11–18.
2. Evaluation of a system for automatic detection of diabetic retinopathy from color fundus photographs in a large population of patients with diabetes / M. D. Abrmoff, M. Niemeijer, M. S. A. Suttorp-Schulten, M. A. Viergever, S. R. Russell, B. V. Ginneken // *Diabetes Care*. 2008. Vol. 31, N 2. P. 193–198.
3. Комкова С. В. Методика формирования вектора признаков по изображениям сетчатки глаза // *Естественные и технические науки*. 2021. № 4. С. 250–252.
4. Комкова С. В. Алгоритм идентификации экссудатов на изображениях сетчатки глаза человека // *Вестник компьютерных и информационных технологий*. 2022. Т. 19, № 1. С. 47–51. <https://doi.org/10.14489/vkit.2022.01>.
5. Glaucoma detection using retinal fundus images: A review / J. Cheng, J. Liu, Y. Xu, F. Yin, D. W. K. Wong // *Computers in biology and medicine*. 2019. N 109. P. 216–229. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2019.04.010>.
6. Automated diagnosis of glaucoma using retinal fundus images / M. U. Akram, S. Khalid, S. A. Khan, S. M. Anwar // *Computers in biology and medicine*. 2020. N 124. P. 103949. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2020.103949>.
7. Glaucoma detection using deep learning and optic disc segmentation / Z. Li, Y. He, S. Keel, W. Meng, R. T. Chang, H. Huang, N. Wang // *IEEE transactions on medical imaging*. 2018. Vol. 37, N 9. <https://doi.org/10.1109/TMI.2018.2829199>.
8. Computer-aided diagnosis of glaucoma: A review / U. R. Acharya, E. Y. K. Ng, J. E. Eugene Koh, D. Wen Long Wong, C. Chee // *Medical and Biological Engineering and Computing*. 2020. Vol. 58, N 11. P. 2531–2553. <https://doi.org/10.1007/s11517-020-02176-x>.
9. Detecting Structure and Progression of Glaucomatous Visual Field Defects Using Deep Learning. Glaucoma detection using machine learning techniques / R. Asaoka, H. Murata, A. Iwase, M. Araie // *Journal of Clinical Medicine*. 2019. Vol. 8, N 12. P. 2090. <https://doi.org/10.3390/jcm8122090>.
10. Identifying medical diagnoses and treatable diseases by image-based deep learning / D. S. Kermany, M. Goldbaum, W. Cai, C. C. S. Valentim, H. Liang, S. L. Baxter, J. Liu // *Cell*. 2018. Vol. 172, N 5. P. 1122–1131. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2018.02.010>.

11. Glaucoma detection using retinal images and deep learning: A review / H. Fu, J. Cheng, Y. Xu, F. Yin, D. W. K. Wong // *Computer methods and programs in biomedicine*. 2019. N 182. P. 105068. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2019.105068>.
12. Diagnostic accuracy of a deep learning system in detecting glaucoma on photographs of the optic disc / V. T. J. Koh, Y. C. Tham, C. Y. Cheung, W. L. Wong, M. Baskaran, S. M. Saw, T. Y. Wong // *Ophthalmology*. 2019. Vol. 126, N 12. P. 1627–1639. <https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2019.06.026>.
13. Glaucoma detection using retinal images: A survey / Y. Xu, J. Cheng, J. Liu, F. Yin, D. W. K. Wong // *Artificial intelligence in medicine*. 2020. N 102. P. 101759. <https://doi.org/10.1016/j.artmed.2019.101759>.
14. Кишечник Е. С., Воронцова И. Г. Диагностические методы оценки состояния макулярного отдела сетчатки нижнего гормонального системного регулирования // *Глаукома*. 2013. Т. 1, № 2. С. 117–119.
15. Клиническая офтальмология: национальное руководство / под ред. Е. Н. Иомдина. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2016.
16. Мещеряков О. В. Методы пассивированного оценивания сетчатого кровотока при глаукоме // *Глаукома*. 2015. Т. 2, № 1. С. 97–106.
17. Сегментирование данных в задачах распознавания объектов / С. В. Дегтярев, Е. А. Криушин, Д. В. Никулин, Е. Н. Иванова // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение*. 2021. Т. 11, № 2. С. 76–86.
18. Конаныхин А. Ю., Конаныхина Т. Н., Панищев В. С. Методы улучшения выделенной области изображения при быстродействующей обработке символьной информации // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение*. 2021. Т. 11, № 4. С. 106–119. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2021-11-4-106-119>.
19. Алгоритм настройки нечеткого логического вывода в медицинских информационных системах, основанных на знаниях / М. С. Голосовский, А. Б. Юдин, В. Р. Медведев, С. Н. Васягин, Е. В. Евтушенко // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение*. 2021. Т. 11, № 4. С. 196–211. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2021-11-4-196-211>.
20. Комкова С. В. Методика обнаружения твердых эксудатов на изображениях глазного дна человека // *Телекоммуникации*. 2022. № 10. С. 24–28.

References

1. Abdel-Razik Youssif A., Ghalwash A., Abdel-Rahman Ghoneim A. Optic disc detection from normalized digital fundus images by means of a vessels' direction matched filter. *Medical Imaging*, 2018, vol. 27, no. 1, pp. 11–18.
2. Abrmoff M. D., Niemeijer M., Suttorp-Schulten M. S. A., Viergever M. A., Russell S. R., Ginneken B. V. Evaluation of a system for automatic detection of diabetic retinopathy from color fundus photographs in a large population of patients with diabetes. *Diabetes Care*, 2008, vol. 31, no. 2, pp. 193–198.
3. Komkova S. V. Metodika formirovaniya vektora priznakov po izobrazheniyam setchatki glaza [Methodology for forming a feature vector based on retinal images]. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki = Natural and Technical Sciences*, 2021, no. 4, pp. 250–252.
4. Komkova S. V. Algoritm identifikacii ekssudatov na izobrazheniyah setchatki glaza cheloveka [Algorithm for identification of exudates in human retinal images]. *Vestnik komp'yuternyh i informacionnyh tekhnologij = Bulletin of Computer and Information Technologies*, 2022, vol. 19, no. 1, pp. 47–51. https://doi.org/10.14489/vkit.2022.01_pp.047-051
5. Cheng J., Liu J., Xu Y., Yin F., Wong D. W. K. Glaucoma detection using retinal fundus images: A review. *Computers in Biology and Medicine*, 2019, no. 109, pp. 216–229. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2019.04.010>
6. Akram M. U., Khalid S., Khan S. A., Anwar S. M. Automated diagnosis of glaucoma using retinal fundus images. *Computers in Biology and Medicine*, 2020, no. 124, p. 103949. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2020.103949>
7. Li Z., He Y., Keel S., Meng W., Chang R. T., Huang H., Wang N. Glaucoma detection using deep learning and optic disc segmentation. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2018, vol. 37, no. 9, pp. 1993–2004. <https://doi.org/10.1109/TMI.2018.2829199>
8. Acharya U. R., Ng E. Y. K., Eugene Koh J. E., Wen Long Wong D., Chee C. Computer-aided diagnosis of glaucoma: A review. *Medical and Biological Engineering and Computing*, 2020, vol. 58, no. 11, pp. 2531–2553. <https://doi.org/10.1007/s11517-020-02176-x>
9. Asaoka R., Murata H., Iwase A., Araie M., Detecting Structure and Progression of Glaucomatous Visual Field Defects Using Deep Learning. Glaucoma detection using machine learning techniques. *Journal of Clinical Medicine*, 2019, vol. 8, no. 12, p. 2090. <https://doi.org/10.3390/jcm8122090>
10. Kermany D. S., Goldbaum M., Cai W., Valentim C. C. S., Liang H., Baxter S. L., Liu J. Identifying medical diagnoses and treatable diseases by image-based deep learning. *Cell*, 2018, vol. 172, no. 5, pp. 1122–1131. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2018.02.010>
11. Fu H., Cheng J., Xu Y., Yin F., Wong D. W. K. Glaucoma detection using retinal images and deep learning: A review. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 2019, no. 182, p. 105068. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2019.105068>

12. Koh V. T. J., Tham Y. C., Cheung C. Y., Wong W. L., Baskaran M., Saw S. M., Wong T. Y. Diagnostic accuracy of a deep learning system in detecting glaucoma on photographs of the optic disc. *Ophthalmology*, 2019, vol. 126, no. 12, pp. 1627–1639. <https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2019.06.026>

13. Xu Y., Cheng J., Liu J., Yin F., Wong D. W. K. Glaucoma detection using retinal images: A survey. *Artificial Intelligence in Medicine*, 2020, no. 102, p. 101759. <https://doi.org/10.1016/j.artmed.2019.101759>

14. Intestines E. S., Vorontsova I. G. Diagnosticheskie metody ocenki sostoyaniya makulyarnogo otdela setchatki nizhnego gormonal'nogo sistemnogo regulirovaniya [Diagnostic methods for assessing the state of the macular retina of the lower hormonal system regulation]. *Glaukoma = Glaucoma*, 2013, vol. 1, no. 2, pp. 117–119.

15. Klinicheskaya oftal'mologiya: nacional'noe rukovodstvo [Clinical ophthalmology: National guidelines]; ed. by E. N. Iomdin. Moscow, GEOTAR-Media Publ., 2016.

16. Meshcheryakov O. V. Metody passificirovannogo ocenivaniya setchatogo krovotoka pri glaukome [Methods of pacified assessment of reticular blood flow in glaucoma]. *Glaucoma = Glaukoma*, 2015, vol. 2, no. 1, pp. 97–106.

17. Degtyarev S. V., Kriushin E. A., Nikulin D. V., Ivanova E. N. Segmentirovanie dannyh v zadachah raspoznavaniya ob"ektov [Data segmentation in object recognition tasks]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2021, vol. 11, no. 2, pp. 76–86.

18. Konanykhin A. Yu., Konanykhina T. N., Panishchev V. S. Metody uluchsheniya vydelennoj oblasti izobrazheniya pri bystrodeystvuyushchej obrabotke simvol'noj informacii [Methods for improving the selected image area with high-speed processing of symbolic information]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2021, vol. 11, no. 4, pp. 106–119. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2021-11-4-106-119>

19. Golosovsky M. S., Yudin A. B., Medvedev V. R., Vasyagin S. N., Yevtushenko E. V. Algoritm nastrojki nechetkogo logicheskogo vyvoda v medicinskih informacionnyh sistemah, osnovannyh na znaniyah [Algorithm for configuring fuzzy inference in medical information systems based on knowledge]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2021, vol. 11, no. 4, pp. 196–211. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2021-11-4-196-211>

20. Komkova S. V. Metodika obnaruzheniya tverdyh eksudatov na izobrazheniyah glaznogo dna cheloveka [Methodology for detecting hard exudates in human fundus images]. *Telekommunikacii = Telecommunications*, 2022, no. 10, pp. 24–28.

Информация об авторе / Information about the Author

Комкова Светлана Владимировна, кандидат технических наук, доцент, Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета имени А. Г. и Н. Г. Столетовых, Владимирская область, г. Муром, Российская Федерация, e-mail: savicheva-svetlana2010@yandex.ru, Researcher ID: N-6360-2016, ORCID: 0000-0002-4204-0268

Svetlana V. Komkova, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Murom Institute (Branch) of the Vladimir State University named after A. G. and N. G. Stoletov, Vladimir Region, Murom, Russian Federation, e-mail: savicheva-svetlana2010@yandex.ru, Researcher ID: N-6360-2016, ORCID: 0000-0002-4204-0268