

## Определение точной границы зрачка\*

Чинаев Н. Н., Матвеев И. А.

nikolaj.chinaev@phystech.edu

Московский физико-технический институт, Вычислительный Центр им. А. А. Дородницына РАН

Предлагается метод определения точной границы зрачка на монохромном изображении глаза. Метод основан на бинаризации изображения с последующим поиском зрачка как одной из компонент связности. Граница зрачка определяется как граница или часть границы компоненты связности. Для отделения зрачка в случае его объединения в одну компоненту связности с другими объектами, а также для проверки правдоподобия решения используется преобразование Хафа. Приведены статистические результаты, показывающие точность работы метода; в качестве тестовых данных использованы изображения из открытой базы данных.

**Ключевые слова:** *выделение радужки, поиск границы зрачка, преобразование Хафа, обработка изображений.*

## Precise pupil border locating\*

Chinaev N. N., Matveev I. A.

Moscow institute of physics and technology, Dorodnitsyn Computer Centre of RAS

Method of locating precise pupil border in monochrome images of eye is proposed. The method is based on image binarisation followed by detection of pupil as one of the connected components. Pupil border is estimated as a boundary or part of the boundary of the connected component. Hough transform is employed to separate pupil in case of its merging to one component with other objects and to verify the plausibility of the detection. Statistical results illustrating performance of the method are presented. Images from public domain database were used for tests.

**Keywords:** *iris segmentation, pupil boundary detection, Hough transform, image processing.*

## Введение

Задача автоматического поиска границы зрачка на фотографии глаза возникает на ранних стадиях обработки входных изображений в системах безопасности и медицинской диагностики. Основные подходы к решению этой задачи: различные виды преобразования Хафа [?, ?, ?, ?], очень популярное в силу простоты морфологическое выделение округлой темной области [?], проекции яркости или ее градиента [?, ?], построение оптимального контура [?], в том числе итеративным подбором при помощи деформируемых моделей [?]. Однако морфологические методы требуют отсутствия бликов и иных шумов на изображении зрачка, что приводит к неудовлетворительным практическим результатам [?]. Проекция градиента яркости и построение оптимальных контуров эффективны только в случае, если центр глаза уже определен хотя бы приблизительно (внутри изображения зрачка), то есть требуют применения дополнительного метода поиска центра.

Достаточно эффективными на широком классе изображений глаза являются методы, использующие идею преобразования Хафа. Суть этого преобразования заключается в следующем: при поиске на изображении некоторого объекта определенного вида (около

---

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 12-07-00778)

ность, прямая и т. д.) принимается в рассмотрение аккумуляторное пространство — пространство параметров, которыми определяется искомый объект. Для окружности произвольного радиуса аккумуляторное пространство трехмерно, так как окружность задается тремя параметрами, например, двумя координатами центра и радиусом. Производится процедура голосования: каждой точке изображения ставится в соответствие некоторое множество из аккумуляторного пространства, состоящее из комбинаций параметров объектов, которым эта точка могла бы принадлежать. В качестве ответа выдается точка из аккумуляторного пространства, попавшая в наибольшее число таких множеств.

В морфологическом подходе и методах, основанных на проекциях яркости, часто применяется бинаризация изображения — устанавливается некоторый порог интенсивности таким образом, чтобы все точки, обладающие меньшей интенсивностью, образовывали связное множество небольшого размера. Такой подход обоснован предположением, что зрачок — наиболее темная область на изображении. Это не всегда оправдывается, поскольку часто после бинаризации остается несколько компонент связности, так как яркость бровей или ресниц может мало отличаться от яркости зрачка или даже быть ниже. Также брови и ресницы могут сливаться со зрачком, образуя одну компоненту неадекватной формы.

В работе сделана попытка совместить достоинства метода бинаризации, извлекающего малое количество точек изображения, представляющих интерес, и преобразования Хафа, которое выделяет форму заданного типа из сильно зашумленных данных. На бинаризованном изображении выделяются компоненты связности, граница каждой из которых подвергается преобразованию Хафа с целью поиска округлых контуров. Использование этого сочетания методов из литературы авторам неизвестно.

## Постановка задачи

Входными данными задачи является монохромное растровое изображение  $M(x, y) = M(\mathbf{p})$  размера  $W \times H$  пикселей, т. е. матрица размера  $W \times H$ , каждый элемент которой содержит число, соответствующее яркости. *Бинаризацией* изображения с порогом  $\theta$  назовем операцию приписывания его элементам двух различных значений, пусть это будет 1 в случае, если элемент был до этого меньше  $\theta$ , и 0 — иначе. *Четырехсвязной окрестностью (4-окрестностью)* пикселя  $(p) = (x, y)$  назовем его четырех соседей:  $\Omega_4(\mathbf{p}) = \{(x + 1, y), (x - 1, y), (x, y + 1), (x, y - 1)\}$ . Аналогично определяется понятие *8-окрестности*  $\Omega_8(\mathbf{p})$ . На бинаризованном изображении *компонентой связности* называется множество точек со значением 1, такое, что из любой из них можно достичь любой другой, последовательно перемещаясь по окрестностям и находясь на каждом шаге в точке со значением 1 (т. е. принадлежащей этой компоненте). Применение 4-окрестности и 8-окрестности индуцирует компоненты 4-связности и 8-связности соответственно. Как правило, компоненты связности определяются на изображении начиная от некоторой стартовой точки, назовем ее *представитель*  $\mathbf{r} = (x_r, y_r)$ . Тогда компоненту связности  $C$  можно определить как множество всех точек  $\mathbf{p}$ , таких, что значение изображения в этой точке равно  $M(\mathbf{p}) = 1$  и существует последовательность точек  $\mathbf{q}_k, k = 1 \dots K$ , такая, что  $\forall k M(\mathbf{q}_k) = 1, \mathbf{p} \in \Omega(\mathbf{q}_1), \forall k \mathbf{q}_k \in \Omega(\mathbf{q}_{k+1}), \mathbf{q}_K \in \Omega(\mathbf{r})$ . *Границей*  $B(C)$  компоненты связности  $C$  назовем множество точек, принадлежащих компоненте, имеющих в своей окрестности точки, не принадлежащие компоненте:  $B(C) = \{\mathbf{p} : \mathbf{p} \in C, \exists \mathbf{q} : \mathbf{q} \in \Omega(\mathbf{p}), \mathbf{q} \notin C\}$ . Граница компоненты 4-связности может быть представлена в виде циклической последовательности 8-связных точек.

Так как зрачок является темной областью изображения, то при значениях порога бинаризации, превышающих его яркость и меньших яркости радужки, он может быть выделен в виде компоненты связности. Граница этой компоненты — последовательность связанных точек — и будет искомой границей зрачка. Однако не всегда зрачок граничит только с более светлой радужкой, но часто бывает прикрыт веками и/или ресницами, что создает помехи двух видов. Во-первых, граница зрачка на изображении присутствует лишь частично. Во-вторых, яркость век и ресниц может быть такой же или даже ниже яркости зрачка, и при выделении компоненты связности зрачок сливается с ними (см. рис. 1 (а)). В этом случае лишь небольшая часть границы компоненты связности является границей зрачка. В таком случае метод должен определить ту часть границы, которая представлена на изображении.

### Описание алгоритма

Алгоритм выполняется как набор шагов.

- Изображение бинаризуется с некоторым порогом бинаризации. Предусмотрено использование нескольких порогов для оптимального отделения зрачка от фона.
- На полученном бинарном изображении строятся компоненты связности. Изображение обычно содержит несколько компонент связности, одна из которых включает зрачок. Граница или часть границы такой компоненты представляет собой линию, близкую к окружности.
- Компоненты связности и их границы поочередно рассматриваются, для границ применяется модификация преобразования Хафа с целью выделения центра гипотетической окружности. Аккумуляторы преобразований Хафа анализируются на наличие характерного максимума, возникающего при условии, что граница или часть границы области связности близки к окружности.
- При наличии такого максимума строится гистограмма расстояний от точки, в которой достигается максимум, до всех точек границы.
- Радиус окружности определяется по пику на этой гистограмме. Точками контура зрачка считаются точки, лежащие на расстоянии от центра, примерно равном полученному радиусу.

Если зрачок не был распознан ни для одной компоненты, то устанавливается следующий порог бинаризации. Если не удалось получить решение ни при одном значении порога, то выдается решение: зрачок не найден.

**Бинаризация.** Применяется стандартная процедура бинаризации, состоящая в том, что устанавливается порог  $\theta$ , после чего всем пикселям изображения  $M$ , значения которых меньше  $\theta$ , присваивается значение 1 (черный цвет на рис. 1 (б)), а оставшимся, где значение больше  $\theta$ , присваивается 0 (белый):

$$M(x, y) = \begin{cases} 1, & M(x, y) \leq \theta \\ 0, & M(x, y) > \theta \end{cases}$$

**Выделение компонент связности.** Бинаризованное изображение  $M$  рассматривается как неориентированный граф, вершинами которого являются пиксели черного цвета с ребрами, построенными по правилу 4-связности. Граф имеет несколько компонент связности, соответствующих отдельным темным областям на изображении. Для каждой компоненты  $C$  определяются следующие характеристики:

- граница  $B = B(C)$  — внешняя граница, заданная как список пикселей;

- представитель  $\mathbf{r} \in B(C)$  — некоторая точка, принадлежащая границе компоненты;
- вес компоненты  $W = |C|$  — число точек, содержащихся в компоненте;
- вес границы  $w = |B|$  — число точек границы.

В списке  $B$  для каждой точки помимо ее координат хранится также ссылка на соседние граничные точки, таким образом, этот список представляет собой связное множество граничных точек.

Выделение компонент производится при помощи поиска в ширину. Как одна из главных целей преследуется построение списка  $B$  указанной структуры для каждой компоненты. Создается матрица  $V$  тех же размеров, что и  $M$ , в которую будет записываться информация о степени изученности точек графа. Значение в  $V$  для каждого пикселя изображения может соответствовать одному из трех возможных состояний: 0 — пиксель еще не обрабатывался; 1 — пиксель обнаружен и является граничной точкой некоторой компоненты; 2 — пиксель обнаружен, при этом он не является граничной точкой или принадлежит внешней границе компоненты, обработка которой завершена. Все элементы  $M$  по очереди просматриваются, и если в некоторый момент найдется не обнаруживавшийся ранее черный пиксель  $\mathbf{p} : M(\mathbf{p}) = 1, V(\mathbf{p}) = 0$ , то это будет свидетельствовать об обнаружении новой компоненты связности; она обрабатывается, и просмотр  $M$  продолжается.

Обработка новой компоненты  $C$  происходит следующим образом: в качестве представителя  $\mathbf{r}$  берется первая обнаруженная точка  $\mathbf{p}$ , которая, как важно заметить, также будет принадлежать внешней границе  $\mathbf{p} \in B$ , далее применяется поиск в ширину (известный так же, как «метод лесного пожара») с небольшими изменениями. Для его работы создается очередь  $Q$ , изначально содержащая единственную точку  $\mathbf{r}$ . Далее на очередном шаге из  $Q$  извлекается элемент  $\mathbf{p}_0$ , находящийся в голове очереди, и в ее конец помещаются все черные точки из 4-окрестности, не обнаруживавшиеся ранее:  $Q := Q + \{\mathbf{p}_i\}, \mathbf{p}_i \in \Omega_4(\mathbf{p}_0), V(\mathbf{p}_i) = 0$ . Сама точка  $\mathbf{p}_0$  помечается как просмотренная, значение  $W$  при этом увеличивается на единицу. Если  $\mathbf{p}_0$  является граничной, то значение  $w$  также увеличивается на 1 и по завершении просмотра соседей ей ставится в соответствие значение  $V(\mathbf{p}) = 1$ , иначе  $V(\mathbf{p}) = 2$ . В итоге обработки компоненты, т. е. когда очередь  $Q$  пуста, всем граничным точкам  $C$  соответствует значение 1 в матрице  $V$ , а внутренним — значение 2.

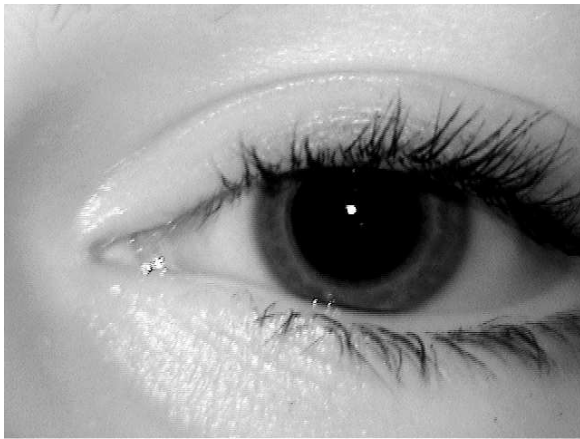
После первого прохода, при котором вычисляются значения  $W$  и  $w$  и размечается матрица  $V$ , осуществляется второй, при котором заполняется список  $B$ . Из точки  $\mathbf{r}$  поиск в ширину запускается во второй раз теперь по точкам, для которых  $V(\mathbf{p}) = 1$ , соединенным 8-связными ребрами.

В оптимальном случае зрачок выделяется в одну компоненту связности, представляющую собой округлый объект, возможно, имеющий несколько пробелов, то есть пустых областей, окруженных точками компоненты. Следует отметить, что границы таких внутренних областей не попадают в список  $B$  и не участвуют в дальнейшей обработке.

На большей части изображений выделяется несколько компонент связности. Они обрабатываются только если  $W$  превосходит некоторый порог, что позволяет отсеять шумы, имеющие обычно малый размер области. В целях оптимизации компоненты обрабатываются в порядке убывания признака:

$$F = \frac{W - w}{w^2}.$$

Признак  $F$  увеличивается при форме границы, приближающейся к окружности, и при росте размера области.



(а) изображение глаза



(б) бинаризованное изображение

Рис. 1: Бинаризация

**Преобразование Хафа для компонент связности.** Достаточно часто на изображении зрачок частично перекрыт веком, и при бинаризации он остается связан с ресницами (рис. 1). В этом случае и сама компонента, и форма ее границы существенно отличаются от круглых. Для выявления округлой части компонент используется разновидность преобразования Хафа. Строится аккумуляторное пространство  $A$ , которое представляет собой матрицу того же размера, что и  $M$ . Изначально оно инициализировано нулевыми значениями. Проводится процедура голосования: строятся внутренние нормали в каждой точке из  $B$ , на луче выбирается отрезок, ограниченный некоторыми значениями  $R_{min}$  и  $R_{max}$ , после чего значения элементов аккумуляторного пространства в точках отрезка увеличиваются на единицу. Построение нормали происходит следующим образом: в окрестности граничной точки  $p_0$  выбирается элемент границы, состоящий из пятнадцати точек, и аппроксимируется касательное направление  $\tau$ :

$$\tau = \sum_{i=-7}^{-1} \frac{p_0 - p_i}{|p_0 - p_i|} + \sum_{i=1}^7 \frac{p_i - p_0}{|p_i - p_0|}$$

Из двух возможных нормальных направлений выбирается то, которое направлено в сторону черной точки, с которой соприкасается  $p_0$ . Если возникает неоднозначность выбора направления, то берется любое — важно найти правильное направление только для точек, принадлежащих фактической границе зрачка, а каждая из них лежит на стыке черной и белой областей, поэтому для них такая проблема не возникнет. Отрезок голосования строится на растре путем применения алгоритма Брезенхема. По окончании процедуры голосования значения в аккумуляторном пространстве сглаживаются фильтром низкой частоты.

На рис. 2,а представлен результат описанного преобразования Хафа для наибольшей из компонент связности изображения рис. 1,б, которая содержит зрачок. Это единственная обработанная компонента, остальные были отбракованы по порогу  $W$ .

**Определение и оценка центра компоненты связности.** На сглаженном аккумуляторе  $A(p)$  определяется положение максимума  $c = \arg \max_p A(p)$  и его величина. На рис. 2,а виден максимум вблизи фактического центра зрачка. Наличие такого максимума является признаком того, что компонента содержит округлый контур (зрачок). Следует оценить достоверность такого предположения для того, чтобы из всех рассматриваемых

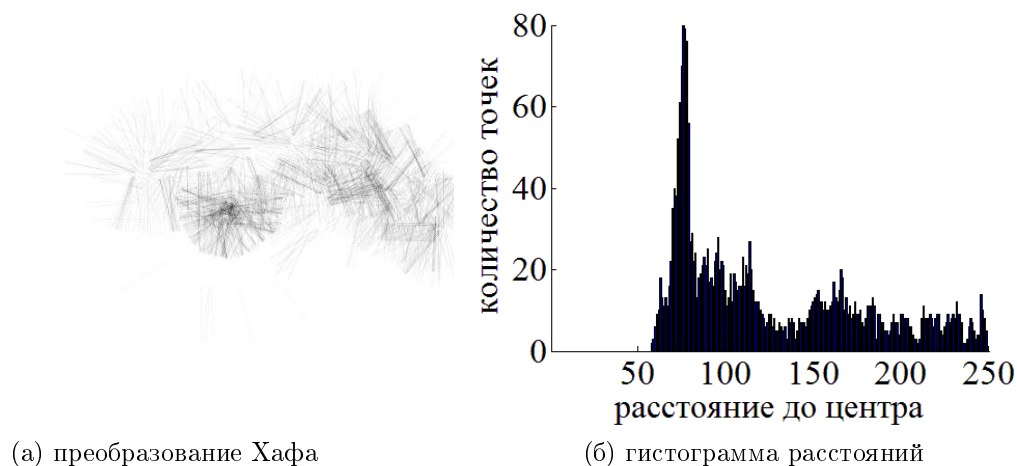


Рис. 2

Таблица 1

Диапазон значений максимума $A(\mathbf{p})$	< 30	30 — 40	40–50	50–70	> 70
Доля компонент, содержащих зрачок			5%	25%	70%
Доля шумовых компонент	80%	10%	10%		

компонент связности выбрать наиболее соответствующую зрачку. Если зрачок содержится в компоненте связности, то, как правило, сигнальные отрезки, проведенные из точек его границы, дают глобальный максимум, который существенно превышает остальные значения. Значения максимумов аккумулятора для компонент связности, содержащих зрачок и не содержащих его (шумовых), были вычислены для базы данных [8]. В таблице 1 приведены доли компонент, содержащих зрачок, и шумовых, имеющих максимум аккумулятора в заданных интервалах.

Видна хорошая разделяемость истинных и шумовых компонент по значению максимума. Таким образом, считается, что компонента может содержать зрачок, если в аккумуляторном пространстве преобразования Хафа этой компоненты содержится точка, набравшая хотя бы 50 голосов. Та небольшая часть компонент, содержащих зрачок, которая отсеивается этим порогом, на самом деле не создает ошибки ложного пропуска, поскольку при другом пороге бинаризации эта компонента изменяет форму, становясь более круглой, порождает максимум выше порога и корректно определяется как зрачок.

**Построение гистограмм радиусов.** Строится гистограмма  $H(r)$  расстояний от найденного центра  $\mathbf{c}$  области до всех точек  $B$ :

$$H(r) = |\mathbf{p} : \mathbf{p} \in B, r - 0.5 < \|\mathbf{c} - \mathbf{p}\| < r + 0.5|$$

Гистограмма в случае принадлежности зрачка компоненте имеет специфический вид. Например, на рис. 2 (б), дана гистограмма для компоненты рис. 1,б. Виден пик, соответствующий радиусу зрачка, присутствующего на изображении:  $R = \arg \max_r H(r)$ .

Окончательный вывод относительно того, содержится ли зрачок в компоненте, делается на основе анализа  $H(r)$ . Вычисляется масса гистограммы в окне шириной 10 с центром в точке  $R$ , где наблюдается максимальное среди всех значение гистограммы. Полученное значение представляет собой оценку длины контура зрачка и сравнивается с  $R$ , домножен-

Таблица 2

Алгоритм	$\overline{Q_C}$ , пикселей	$\overline{Q_R}$ , пикселей	$\overline{T}$ , мс
Daugman [?]	3,73	4,54	478
Daugman [?]	3,27	3,19	27
Masek [?]	5,32	6,72	108
Wildes [?]	3,44	4,38	394
Ma [?]	4,29	4,65	376
Dey [?]	1,53	0,56	25
Матвеев [?]	3,42	—	5
Предлагаемый	5,1	4,47	1200

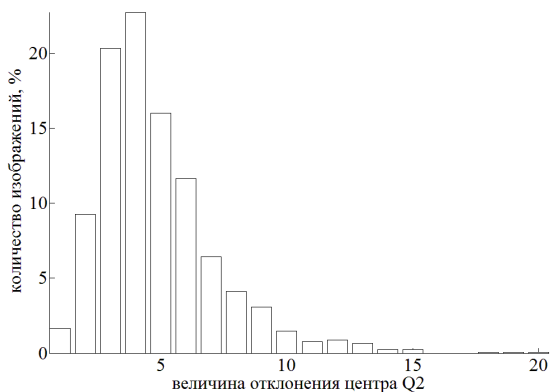
ным на некоторый коэффициент  $\alpha$ . Ширина окна и  $\alpha$  в работе подобраны субъективно, требуется их обоснование и уточнение в более подробном исследовании.

## Экспериментальные результаты

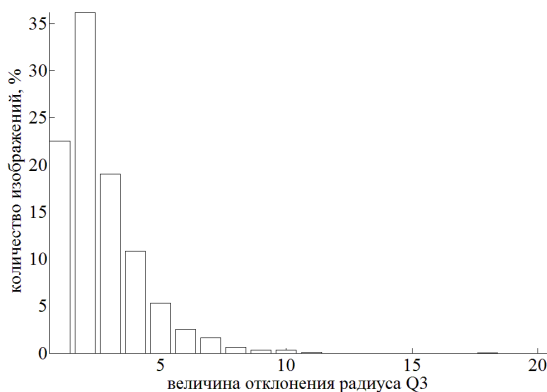
Для тестирования были использованы изображения открытой базы [8]. Эти изображения были размечены экспертами: на каждом была построена окружность радиуса  $r_0$  с центром в точке  $(x_0, y_0)$ , которой приближалась граница зрачка. Найденные алгоритмом центр  $(x, y)$  и радиус  $r$  окружности зрачка на каждом изображении сравнивались с экспертными и вычислялись отклонения  $Q_C = |x_0 - x| + |y_0 - y|$  и  $Q_R = |r - r_0|$ . На диаграммах рис. 3 показаны распределения этих отклонений.

Оценка времени обработки изображений на компьютере с ОЗУ 2 ГБ и процессором частотой 2,8 ГГц имеет следующий вид: 56% изображений обрабатывались не дольше одной секунды, и 80% обрабатывались не дольше 2 с. На некоторых изображениях время обработки могло доходить до 15 с. Такое замедление связано с тем, что первые несколько порогов бинаризации не позволяли определить зрачок как компоненту связности.

В табл. 2 приведено сравнение метода с известными аналогами по среднему отклонению центра зрачка  $\overline{Q_C}$  (среднее величины  $Q_C$  по всей тестовой выборке), среднему отклонению радиуса  $\overline{Q_R}$  и среднему времени исполнения. При значительно большем времени исполнения метод показывает сравнимые с аналогами характеристики точности.



(а) Распределение ошибки положения центра



(б) Распределение ошибки радиуса

Рис. 3

## Заключение

Предложен метод выделения контура зрачка на изображении глаза. Контур строится из точек, лежащих на границе области зрачка, полученной при бинаризации изображения как компонента связности множества темных точек. Для выбора правильной (наиболее близкой к окружности) компоненты (или ее части) используется преобразование Хафа для граничных точек, приводящее к выделению центра ее округлой части. Радиус окружности определяется как максимум гистограммы расстояний граничных точек до выделенного центра. Сами точки контура зрачка затем выбираются из всего множества точек границы как имеющие близкое к этому радиусу расстояние до центра. Проведена апробация работы алгоритма на наборе изображений из открытой базы данных ВАН.

Использование преобразования Хафа позволяет корректно выделять истинные центр, радиус и контур зрачка даже при наличии больших помех, при условии лишь частичной видимости контура зрачка на изображении. Недостатком метода является потенциально большое время работы, возникающее при переборе многих компонент связности и нескольких порогов бинаризации. Этот недостаток частично скомпенсирован введением признака качества компоненты связности.

## Литература

- [1] *Daugman J.* How iris recognition works // *Proc. IEEE Trans. Circ. Syst. Video Technol.* 2004. Vol. 14. Pp. 21–30.
- [2] *Мамзеев И. А.* Поиск центра радужки на изображении методом Хафа с двумерным пространством параметров // *Известия РАН. Теория и системы управления.* 2012. Vol. 5. Pp. 44–51.
- [3] *Li Ma, Tan T., Wang Y.* Iris recognition using circular symmetric filters // *Proceedings of the 16th International Conference on Pattern Recognition.* 2002. Pp. 414–417.
- [4] *Wildes R. P.* Iris recognition an emerging biometric technology // *Proceedings of the IEEE.* 1995. Vol. 85.
- [5] *Kennell L., Ives R. W., Gaunt R. M.* Binary morphology and local statistics applied to iris segmentation for recognition // *Proc. of the 2006 IEEE International Conference on Image Processing, Atlanta, GA.* 2006. Pp. 293–296.
- [6] *Ritter M.* Location of the pupil-iris border in slit-lamp images of the cornea // *Proceedings of the International Conference on Image Analysis and Processing.* 1999.
- [7] *Ritter M., Cooper J. R.* Locating the iris: A first step to registration and identification // *Proc. 9th IASTED International Conference on Signal and Image Processing.* 2003. Pp. 507–512.
- [8] *Monro D. M., Rakshit S., Zhang D.* Universtiy of Bath, U.K. Iris Image Database.