

МЕТОДЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ГЛАЗНОГО ДНА

Автор тезиса: **Мехринисо Ахадова Фарходовна**
 магистр, специалист по информационным технологиям
 DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.23025893>

Современные системы компьютерного зрения и машинного обучения предъявляют высокие требования к качеству исходных изображений. В медицинской диагностике качество входных данных оказывает непосредственное влияние на точность обнаружения патологий, выделения признаков и последующей классификации. Особенно это касается изображений глазного дна, содержащих большое количество мелких анатомических структур, таких как сосуды сетчатки, макулярная область и диск зрительного нерва.

Предварительная обработка изображений представляет собой совокупность методов, направленных на улучшение качества исходных данных перед выполнением анализа. Основной целью данного этапа является устранение различных искажений, повышение контрастности, уменьшение уровня шумов и подготовка изображения к последующему извлечению признаков.

Для изображений глазного дна этап предварительной обработки имеет особое значение, поскольку качество снимков может существенно различаться в зависимости от параметров съемки, характеристик используемого оборудования, индивидуальных особенностей пациента и внешних факторов. В результате изображения могут содержать шумы, размытость, неравномерное освещение и низкую контрастность.

В современных исследованиях предварительная обработка рассматривается как обязательный этап автоматизированного анализа медицинских изображений.

В современных системах компьютерной диагностики офтальмологических заболеваний цифровые изображения глазного дна являются основным источником диагностической информации. Развитие цифровой офтальмологии и методов искусственного интеллекта привело к широкому использованию изображений сетчатки для выявления патологических изменений, связанных с диабетической ретинопатией, глаукомой, возрастной макулярной дегенерацией, а также врожденными аномалиями развития глаза, включая колобому сетчатки и зрительного нерва.

Цифровое изображение глазного дна представляет собой двумерную дискретную функцию, содержащую информацию о распределении яркости и цвета в исследуемой области сетчатки. В отличие от визуального осмотра, цифровое представление изображения позволяет применять математические методы анализа, автоматизированную обработку и алгоритмы машинного обучения для обнаружения патологических изменений.

Получение цифрового изображения осуществляется с помощью фундус-камеры, которая преобразует оптическое изображение внутренних структур глаза в набор цифровых данных. В результате формируется матрица пикселей, каждый элемент которой характеризуется определёнными уровнями яркости или цветовой информацией.

С математической точки зрения цифровое изображение можно представить в виде функции:

$$f(x,y)$$

Формула 2.1.1. Цифровое изображение как функция

где:

x — координата пикселя по горизонтали;

y — координата пикселя по вертикали;

$f(x,y)$ — значение яркости или цвета в данной точке изображения

$$I = \begin{bmatrix} i_{11} & i_{12} & \dots & i_{1N} \\ i_{21} & i_{22} & \dots & i_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ i_{M1} & i_{M2} & \dots & i_{MN} \end{bmatrix}$$

Формула 2.1.2. Матричное представление изображения

где:

M — количество строк изображения;

N — количество столбцов;

i_{ij} — интенсивность пикселя.

Для полутоновых изображений значения пикселей обычно принадлежат диапазону

Формула 2.1.3. Диапазон интенсивности пикселя где:

0- соответствует абсолютно чёрному цвету;

$$0 \leq i_{ij} \leq 255$$

255 -соответствует абсолютно белому цвету.

Например, фрагмент изображения может быть представлен следующей матрицей:

$$\begin{bmatrix} 125 & 130 & 128 \\ 140 & 145 & 142 \\ 150 & 152 & 149 \end{bmatrix}$$

Формула 2.1.4. Пример фрагмента изображения в виде матрицы

Каждый элемент матрицы отражает уровень яркости соответствующего пикселя.

Цветовая модель HSV (Hue, Saturation, Value) — это нелинейное преобразование трехмерного декартова пространства RGB в цилиндрическую систему координат. В отличие от аппаратно-ориентированной модели RGB, HSV является перцептивно-ориентированной моделью, то есть она гораздо ближе к тому, как человеческое зрение воспринимает и описывает цвет.

Нюе (H) — Цветовой тон (оттенок): Задаёт положение цвета в спектре и выражается в виде угла на цветовом круге от 0° до 360° . Основные цвета делят круг на равные секторы:

- $0^\circ / 360^\circ$ — Красный (Red)
- 120° — Зеленый (Green)
- 240° — Синий (Blue)
- Промежуточные: 60° (Желтый), 180° (Голубой), 300° (Пурпурный).

Saturation (S) — Насыщенность (от 0% до 100%): Определяет «чистоту» цвета или степен его разбавления белым светом.

- 100% (или 1.0) — чистый спектральный цвет (максимально сочный).

Multidisciplinary research and Innovation (SICMRI 2026)

- 0% (0.0) — ахроматический цвет (оттенок серого, так как цвет полностью размыт белым).

Value / Brightness (V) — Значение / Яркость (от 0% до 100%): Определяет интенсивность или силу светового излучения.

0% (или 0.0) — абсолютная темнота (черный цвет), независимо от значений H и S.

100% (или 1.0) — максимальная яркость (при S=0 — это чистый белый, при S=1 — максимально яркий чистый цвет).

Геометрическое представление

В трехмерном пространстве модель HSV чаще всего представляется в виде перевернутого шестиугольного конуса (гексаконуса) или цилиндра.

- Центральная вертикальная ось — это ось яркость V (шкала серого от черной вершины V=0 до белого основания V=1).

- Радиальное расстояние от оси до внешней границы конуса — это насыщенность S.

- Угол вокруг центральной оси — это цветовой тон H.

Математический вывод формул преобразования RGB на HSV

Пусть исходные координаты цвета в пространстве RGB нормализованы и лежат в диапазоне $[0, 1]$:

$$R, G, B \in [0, 1]$$

Вывод формул базируется на анализе проекции цветового куба RGB вдоль его главной ахроматической диагонали (линии черного-белого) на плоскость, перпендикулярную ей. В результате этой проекции трехмерный куб видится как правильный шестиугольник (гексагон).

Шаг 1. Нахождение экстремумов и хроматической амплитуды. Для вычисления параметров HSV сначала определяются максимальное и минимальное значения среди трех каналов, а также

$$V_{max} = \max(R, G, B)$$

их разность (размах):

$$V_{min} = \min(R, G, B)$$

$$\Delta = V_{max} - V_{min}$$

Формула 2.1.14. Хроматическая амплитуда

Шаг 2. Вывод координаты V (Яркость). Яркость в модели HSV определяются просто как максимальная интенсивность среди трех

$$V = V_{max}$$

Формула 2.1.15. Яркость в модели HSV

каналов:

Шаг 3. Вывод координаты S (Насыщенность). Насыщенность показывает отношение хроматической составляющей к максимальной яркости. Если максимальная яркость равна нулю, то это черный цвет, где насыщенность не имеет физического смысла (принимается за 0):

Шаг 4. Вывод координаты H (Цветовой тон) Цветовой тон

$$S = \begin{cases} 0, & \text{если } V_{max} = 0, \\ \frac{\Delta}{V_{max}}, & \text{если } V_{max} > 0. \end{cases}$$

Multidisciplinary research and Innovation (SICMRI 2026)

Формула 2.1.16. Насыщенность в модели HSV

определяется тем, какой из трех каналов (R, G, B) является доминирующим ($V_{\max}$).

Шестиугольник проекции делится на 6 секторов по 60° каждый:

Если $\Delta = 0$, то $R=G=B$. Это точка на ахроматической оси (серый цвет). Оттенок неопределен:

$$H=0^\circ$$

Если доминирует Красный канал ($V_{\max} = R$), то цвет находится в секторе вокруг 0° (между пурпурным и желтым). Направление сдвига определяется разность между Зеленым и Синим:

$$H=60^\circ \times \left(\frac{G-B}{\Delta} \bmod 6 \right)$$

Формула 2.1.17. Цветовой тон при доминировании красного канала

Если доминирует Зеленый канал ($V_{\max} = G$), цвет находится в секторе вокруг 120° (между желтым и голубым):

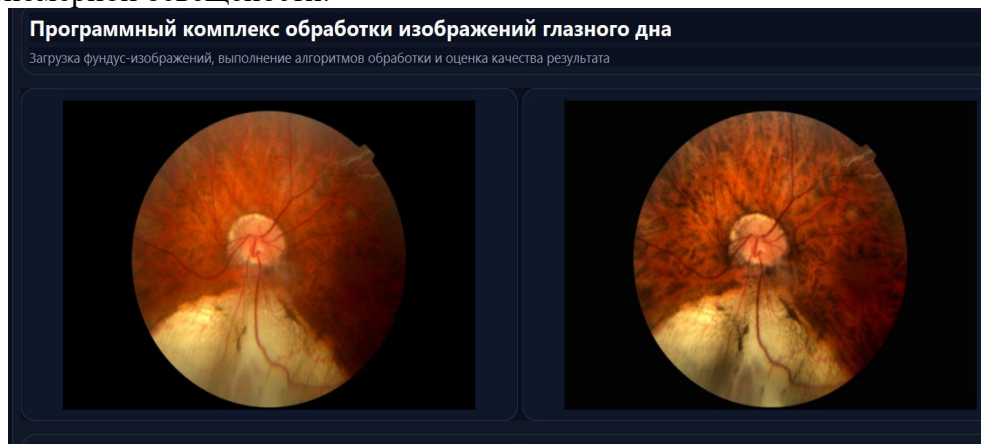
$$H=60^\circ \times \left(\frac{B-R}{\Delta} + 2 \right)$$

Формула 2.1.18. Цветовой тон при доминировании зелёного канала Если доминирует Синий канал ($V_{\max} = B$), цвет находится в секторе вокруг 240° (между голубым и пурпурным):

$$H=60^\circ \times \left(\frac{R-G}{\Delta} + 4 \right)$$

Формула 2.1.19. Цветовой тон при доминировании синего канала

Методы гистограммной обработки являются фундаментальным инструментом в компьютерном зрении, особенно при анализе медицинских изображений (таких как снимки глазного дна / fundus-изображения), где необходимо четко дифференцировать границы тканей в условиях неравномерной освещенности.



Ниже представлено полное научно-теоретическое описание эволюции этих методов: от классической гистограммы до математической модели алгоритма **CLANE**.

Гистограмма яркости — это дискретная функция, отражающая статистическое распределение пикселей цифрового изображения по уровням их интенсивности. Пусть полутоновое (grayscale) изображение I имеет размерность $M \times N$ пикселей и содержит L возможных уровней яркости (для

8-битного изображения $L = 256$, диапазон $[0, 255]$). Математически гистограмма выражается как дискретная функция:

$$h(r_k) = n_k$$

Формула 2.1.20. Гистограмма яркости

где:

r_k — k -й уровень яркости ($k = 0, 1, \dots, L-1$).

n_k — количество пикселей на изображении, имеющих уровень яркости r_k

Для корректного математического анализа выполняется **нормирование гистограммы**, что переводит её в функцию плотности распределения вероятностей:

$$p(r_k) = \frac{n_k}{M \times N}, \quad \sum_{k=0}^{L-1} p(r_k) = 1$$

Формула 2.1.21. Нормированная гистограмма

где $p(r_k)$ — вероятность того, что случайно выбранный пиксель изображения имеет интенсивность r_k .

Алгоритм: HSV + CLAHE

MSE : 85.4934

NRMSE : 0.1385

PSNR : 28.81 dB

SSIM : 0.6609

Цветовая модель CIE LAB (CIELAB) — это аппаратно-

$$h_{mod}(r_k) = \begin{cases} N_{clip} + L_{avg}, & \text{если } h(r_k) \geq N_{clip}, \\ h(r_k) + L_{avg}, & \text{если } h(r_k) < N_{clip}. \end{cases}$$

Формула 2.1.23. Модифицированная гистограмма CLAHE

независимое трехмерное цветовое пространство, разработанное Международной комиссией по освещению (CIE) в 1976 году в качестве международной стандартной модели.

В отличие от RGB или HSV, пространство LAB разработано на основе теории оплотенных цветов Эвальда Геринга и является перцептивно однородным (изменение цвета в любой точке пространства математически соответствует степени изменения, воспринимаемого человеческим глазом).

Пространство CIE XYZ (Базовый эталон) Пространство CIE 1931 XYZ — это фундаментальный математический базис колориметрии. Оно было построено на основе экспериментов по визуальному соответствию цветов у стандартного человеческого наблюдателя.

Основная особенность XYZ заключается в том, что координата Y строго соответствует относительной яркости (Luminance) светового потока, а координаты X и Z описывают хроматическую (цветовую) информацию.

Мнимые первичные цвета X, Y, Z были выбраны искусственно так, чтобы все реальные цвета, воспринимаемые человеком, имели исключительно положительные координаты.

Multidisciplinary research and Innovation (SICMRI 2026)

Модель LAB базируется на физиологическом факте: мозг человека воспринимает цвет как разность между парами оппонентных сигналов: «красный-зеленый» и «желтый-синий». Пространство описывается тремя декартовыми координатами:

L(Lightness) — Светлота: Изменяется от 0 (абсолютно черный) до 100 (идеально белый).

a — Хроматическая координата «красный — зеленый»:

Отрицательные значения (до -128) сдвигают цвет в сторону зеленого. Положительные значения (до +127) сдвигают цвет в сторону красного.

b — Хроматическая координата «желтый — синий»:

Отрицательные значения (до -128) сдвигают цвет в сторону синего.

Положительные значения (до +127) сдвигают цвет в сторону желтого.

При $a = 0$ и $b = 0$ цвет является строго ахроматическим (оттенком серого с заданной светлотой L).

Математическое преобразование RGB на CIE XYZ.

Прямой перевод из RGB в LAB невозможен. Поскольку RGB зависит от конкретного устройства (монитора), его сначала переводят в аппаратно-независимое линейное пространство, затем в эталонное пространство CIE XYZ, и только после этого — в LAB.

Рассмотрели стандартный профиль sRGB с точкой белого D65.

Шаг 1. Гамма-декомпрессия (Линеаризация sRGB)

Исходные 8-битные координаты пересчитываются в диапазон $[0, 1]$ и преобразуются в линейные энергетические значения (на примере канала R):

$$R_{linear} = \begin{cases} \frac{R_{srgb}}{12.92}, & \text{если } R_{srgb} \leq 0.04045, \\ \left(\frac{R_{srgb} + 0.055}{1.055} \right)^{2.4}, & \text{если } R_{srgb} > 0.04045. \end{cases}$$

Формула 2.1.24. Гамма-декомпрессия sRGB

Шаг 2. Линейное матричное преобразование sRGB на XYZ

Линейные компоненты умножаются на трансформационную матрицу, построенную под цветовой охват sRGB и опорный белый свет D65:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4124 & 0.3576 & 0.1805 \\ 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9505 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} R_{linear} \\ G_{linear} \\ B_{linear} \end{bmatrix}$$

Формула 2.1.25. Переход из линейного sRGB в CIE XYZ

Математическое преобразование CIE XYZ на CIE LAB.

Для перехода к LAB координаты XYZ необходимо нормализовать относительно опорной точки белого (X_n, Y_n, Z_n). Для стандартного источника освещения D65 (полуденный дневной свет) при 2-градусном стандартном наблюдателе эти константы равны:

$$X_n = 0.95047, \quad Y_n = 1.00000, \quad Z_n = 1.08883$$

Формула 2.1.26. Опорная точка белого D65

Формулы перехода:

Сначала вычисляются вспомогательные функции для каждой оси:

Scottish International Conference on Multidisciplinary research and Innovation (SICMRI 2026)

$$f(t) = \begin{cases} t^{1/3}, & \text{если } t > \delta, \\ \frac{t}{3\delta^2} + \frac{4}{29}, & \text{если } t \leq \delta. \end{cases}$$

Формула 2.1.27. Вспомогательная функция для CIE LAB

Конечные координаты пространства LAB рассчитываются по формулам:

$$b = 200 \cdot \left[f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) \right]$$

Формула 2.1.28. Координата b в CIE LAB

$$a = 500 \cdot \left[f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) \right]$$

Формула 2.1.29. Координата a в CIE LAB

$$L = 116 \cdot f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16$$

Формула 2.1.30. Светлота L в CIE LAB

