

Лекция 4

Цвет и морфология

Курс «Компьютерное зрение»

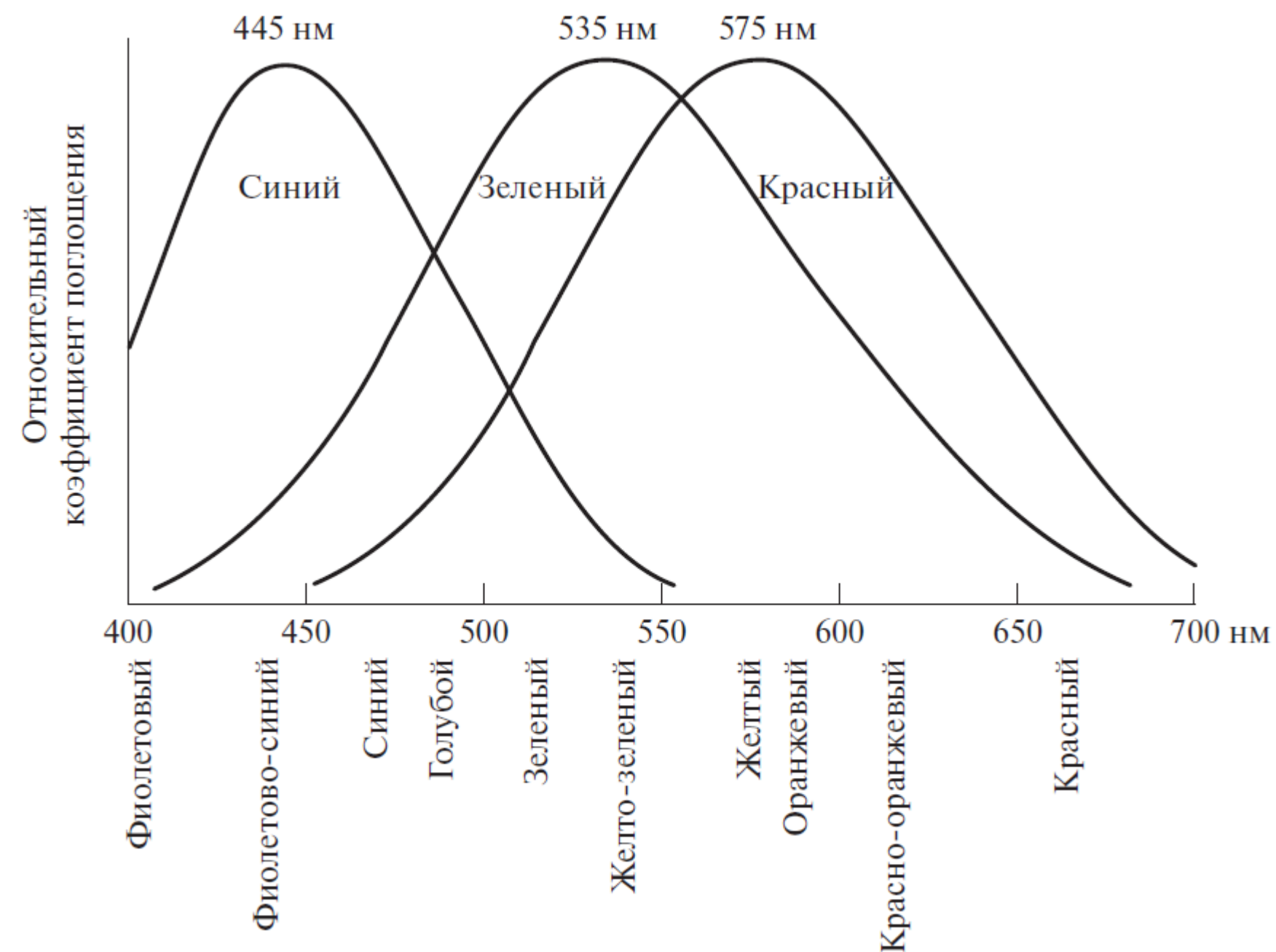
Обработка цветных изображений

Основы теории цвета

Обработка цветных изображений:

- Обработка в натуральных цветах
- Обработка в псевдоцветах

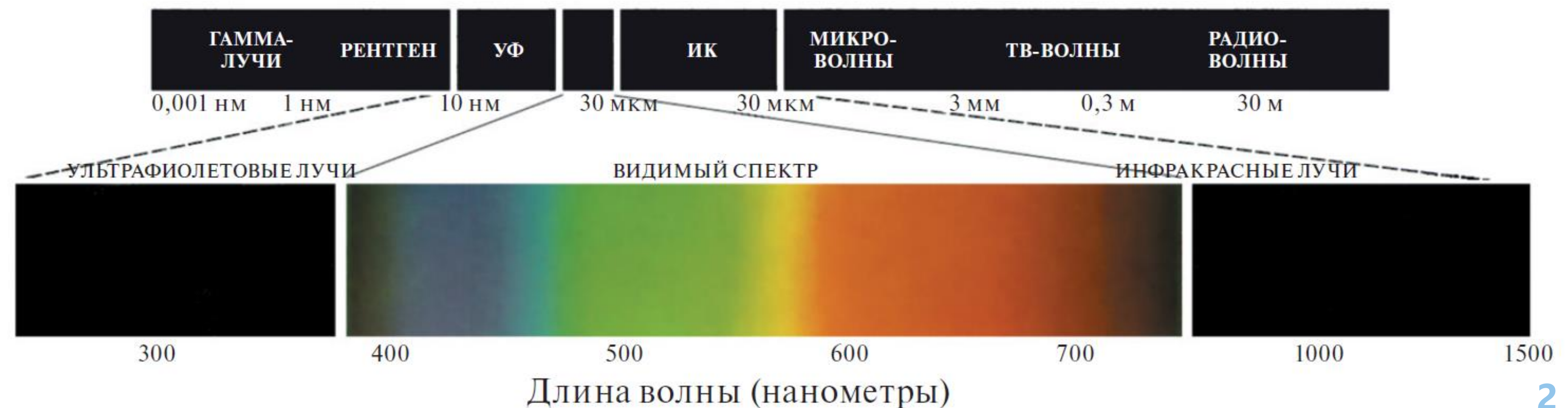
Кривые спектральной чувствительности колбочек человеческого глаза



Первичные и вторичные основные цвета световых источников и красителей



Видимый диапазон электромагнитного спектра



Обработка цветных изображений

Диаграмма цветностей

Формирование изображения матрицей

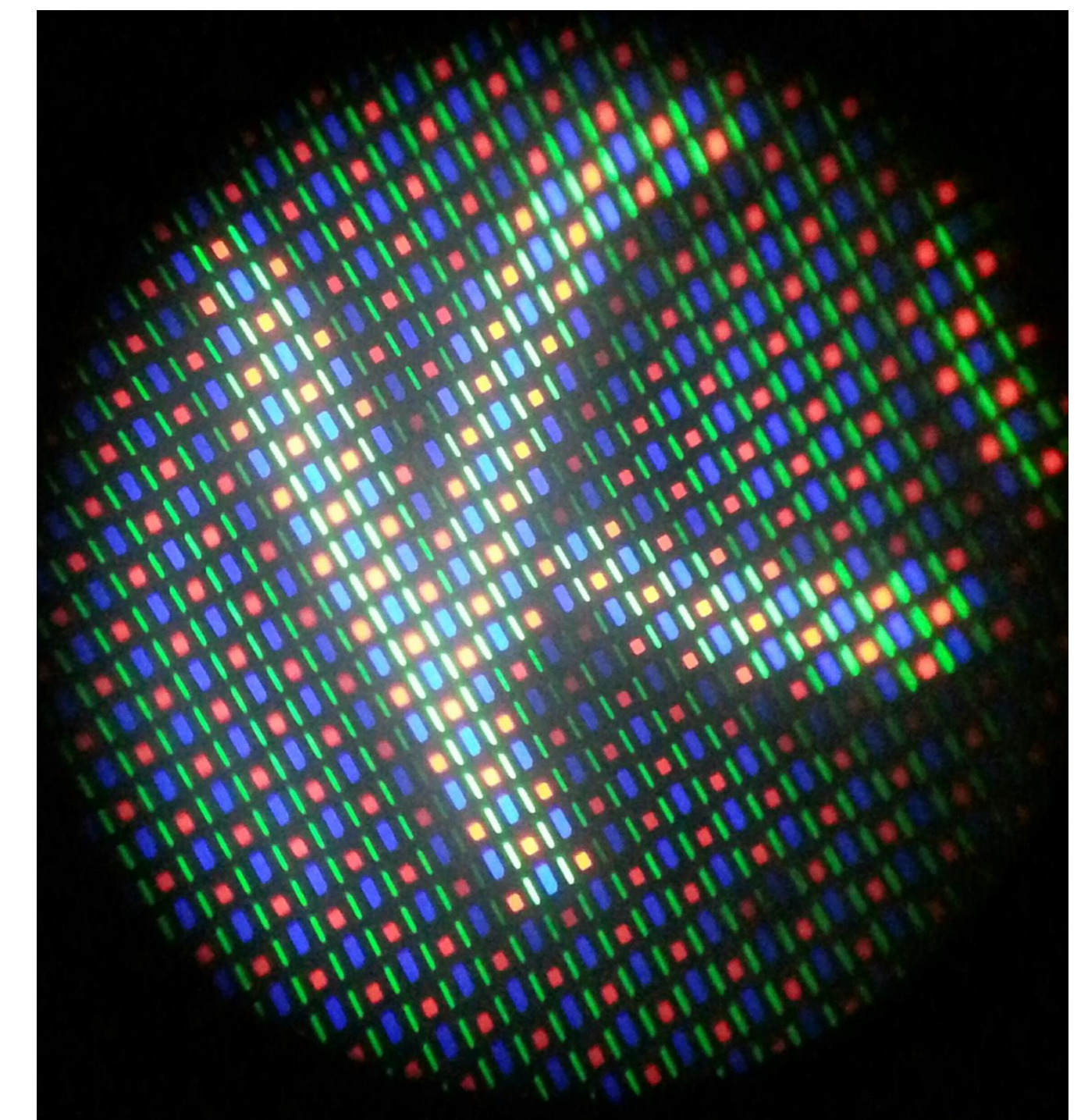
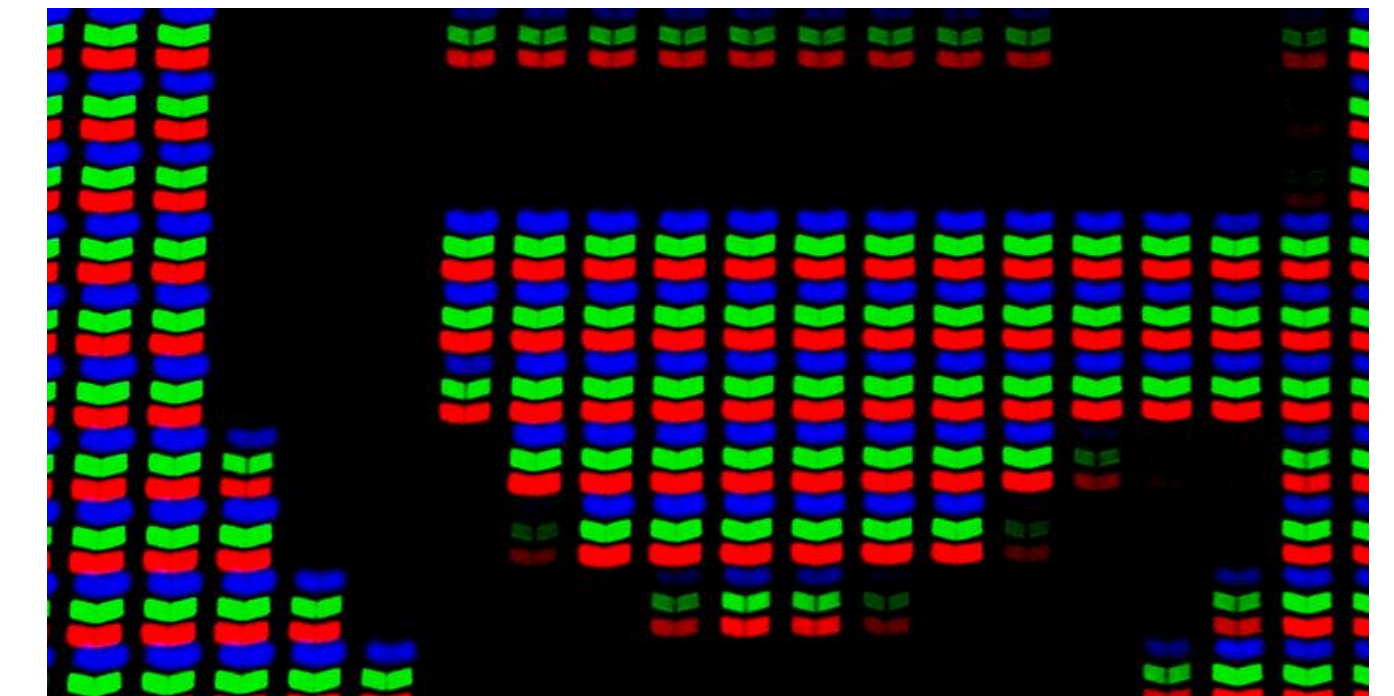
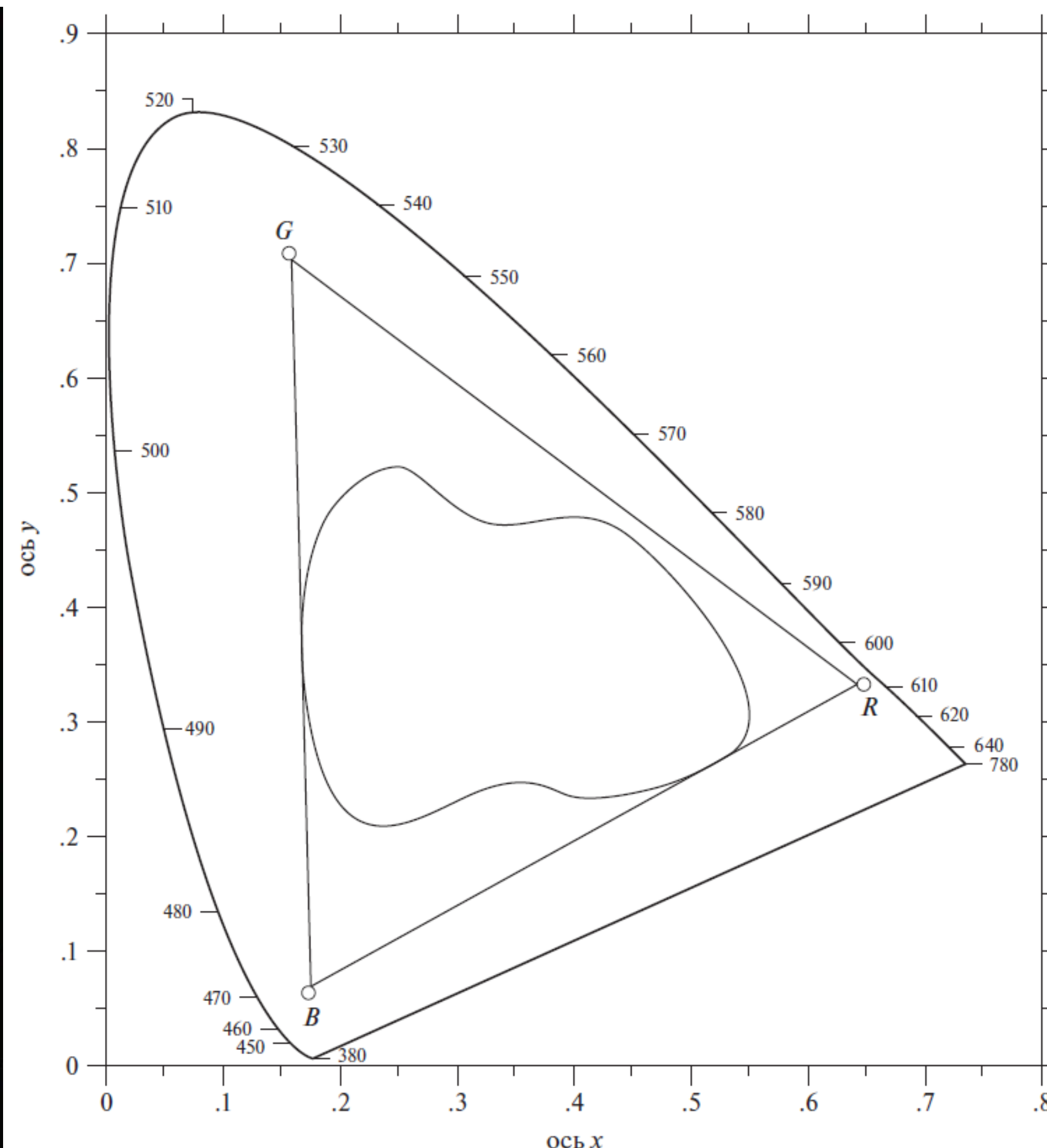
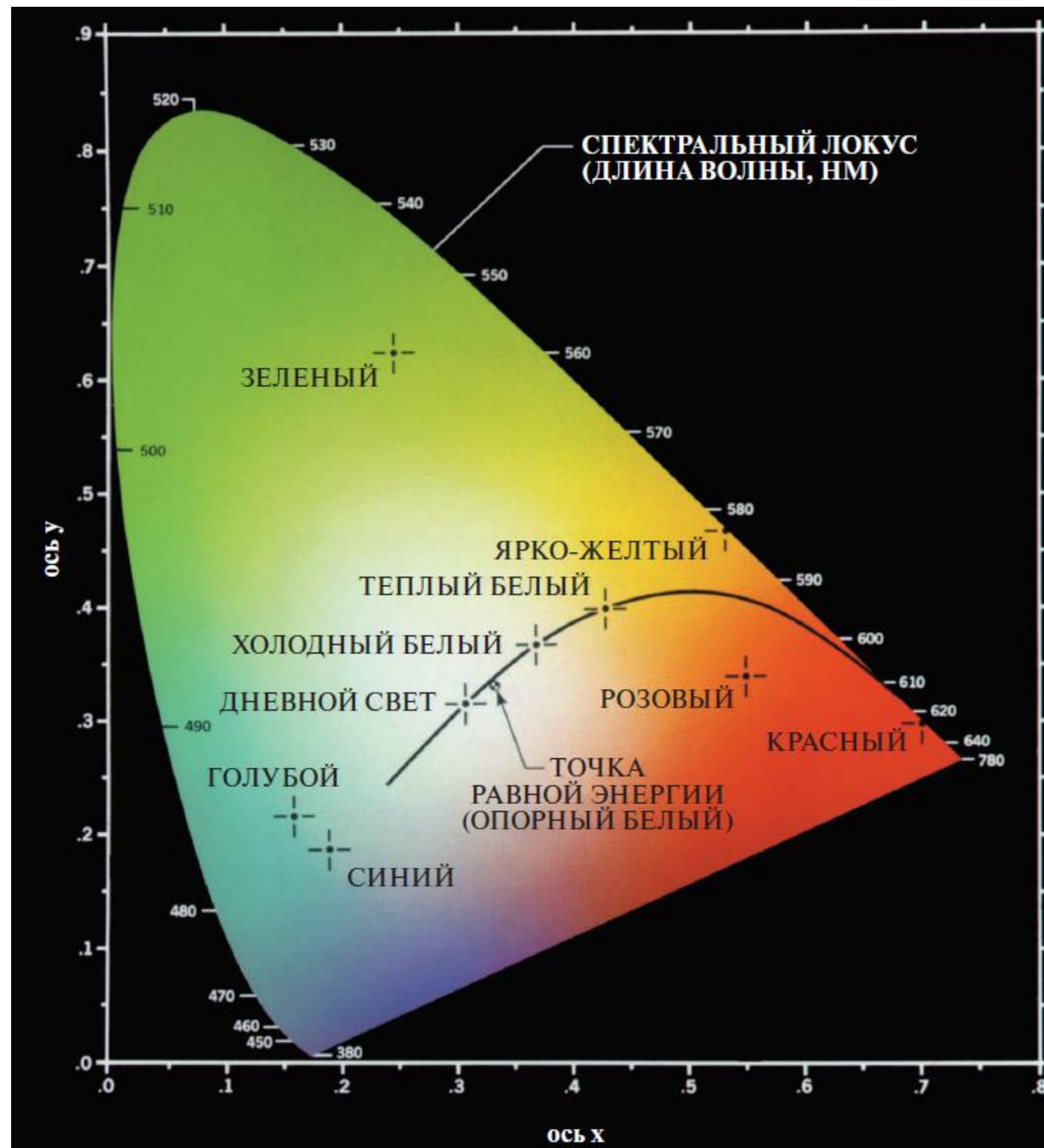


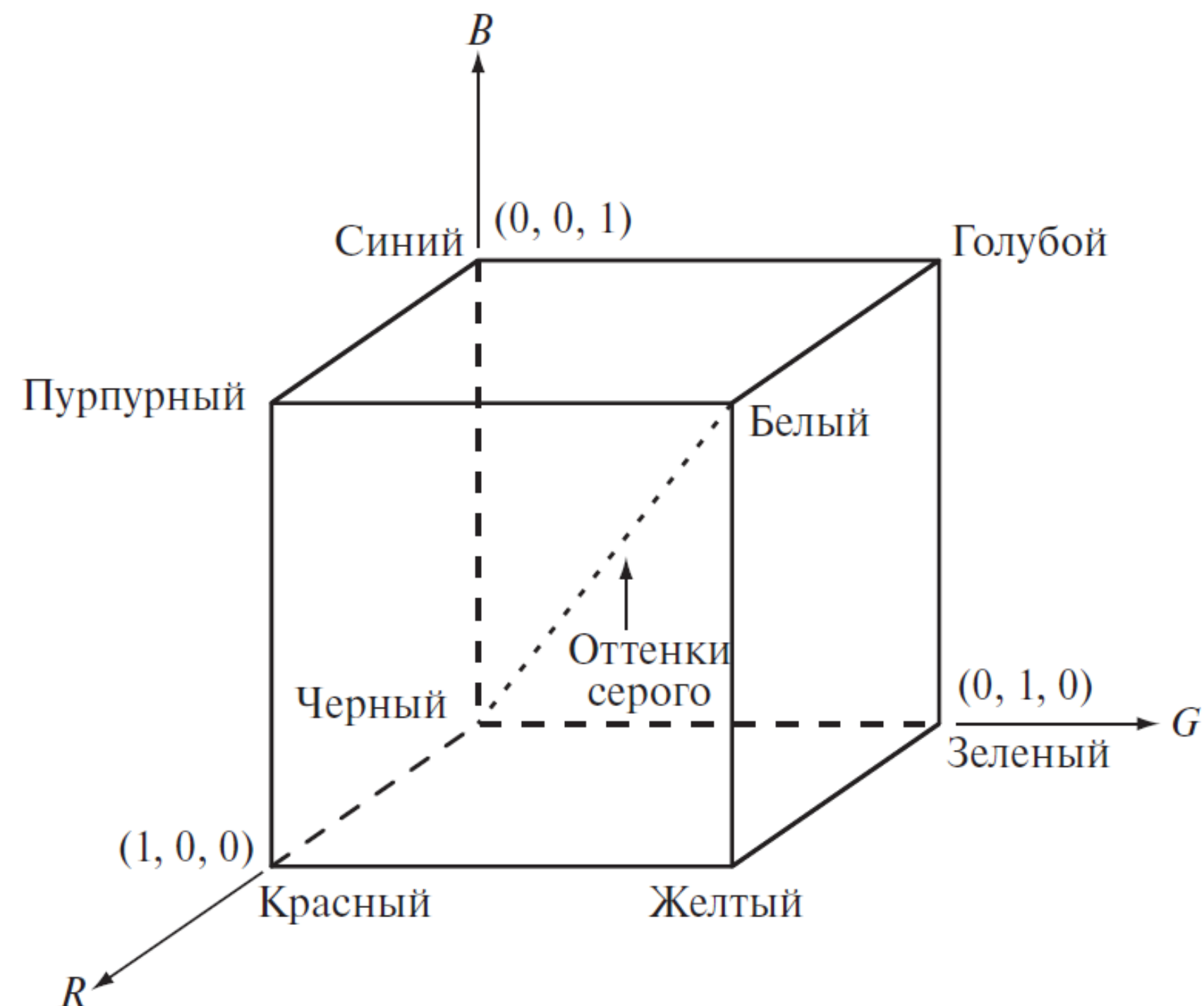
Диаграмма цветностей

Обработка цветных изображений

Цветовая модель RGB

- Каждый цвет представляется красным, зеленым и синим первичными цветами
- В основе – декартова система координат

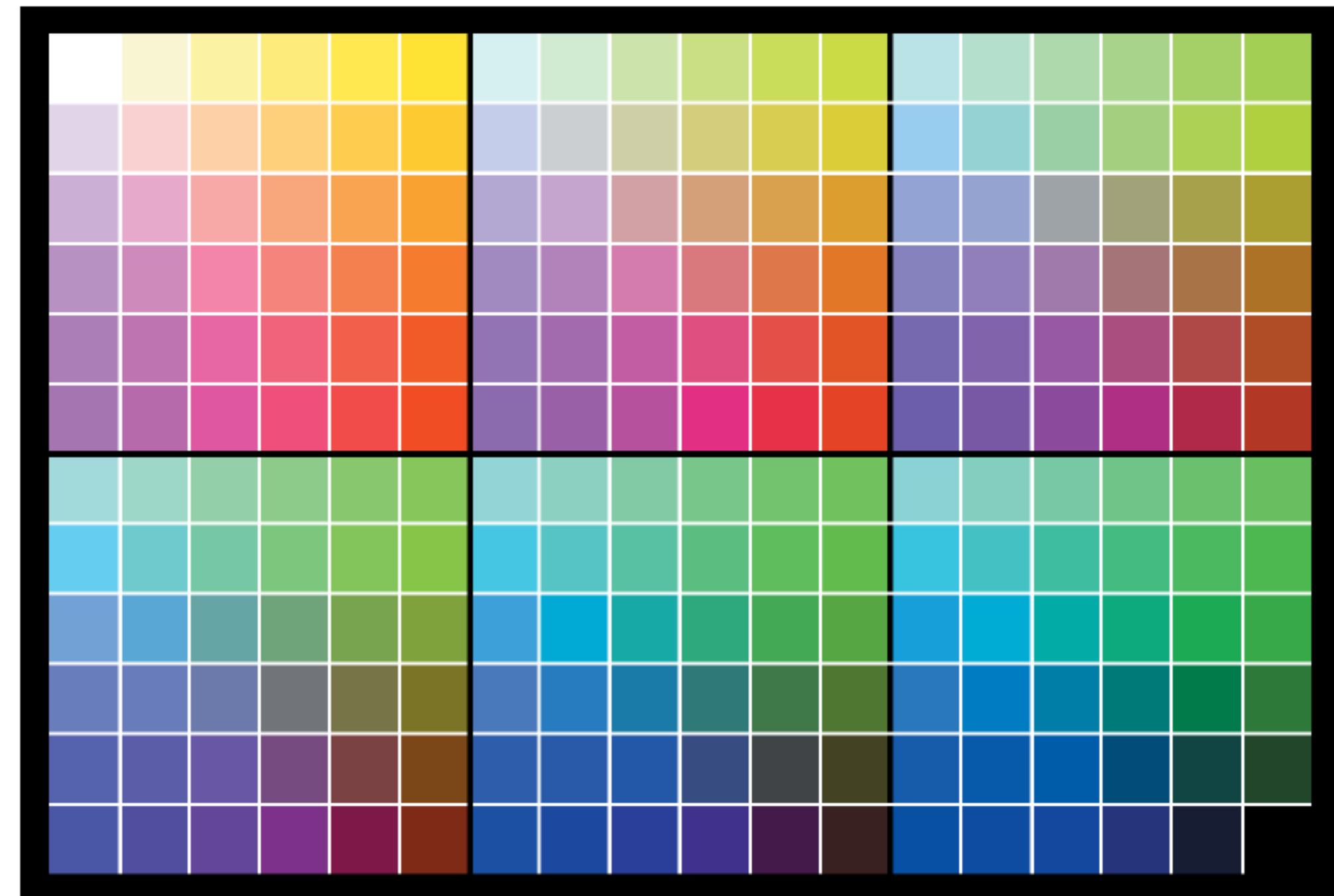
Схематическое изображение
цветового куба RGB



24-битовый
цветовой куб RGB



Палитра 216 фиксированных RGB-цветов



16 равноотстоящих оттенков серого
цвета RGB-модели

Обработка цветных изображений

Цветовая модель HSI

- Hue – цветовой тон
- Saturation – насыщенность
- Intensity – интенсивность

Преобразование RGB => HIS

- Цветовой тон

$$H = \begin{cases} \theta & \text{при } B \leq G, \\ 360^\circ - \theta & \text{при } B > G, \end{cases} \quad \theta = \arccos \left\{ \frac{\frac{1}{2}[(R-G) + (R-B)]}{[(R-G)^2 + (R-B)(G-B)]^{1/2}} \right\}$$

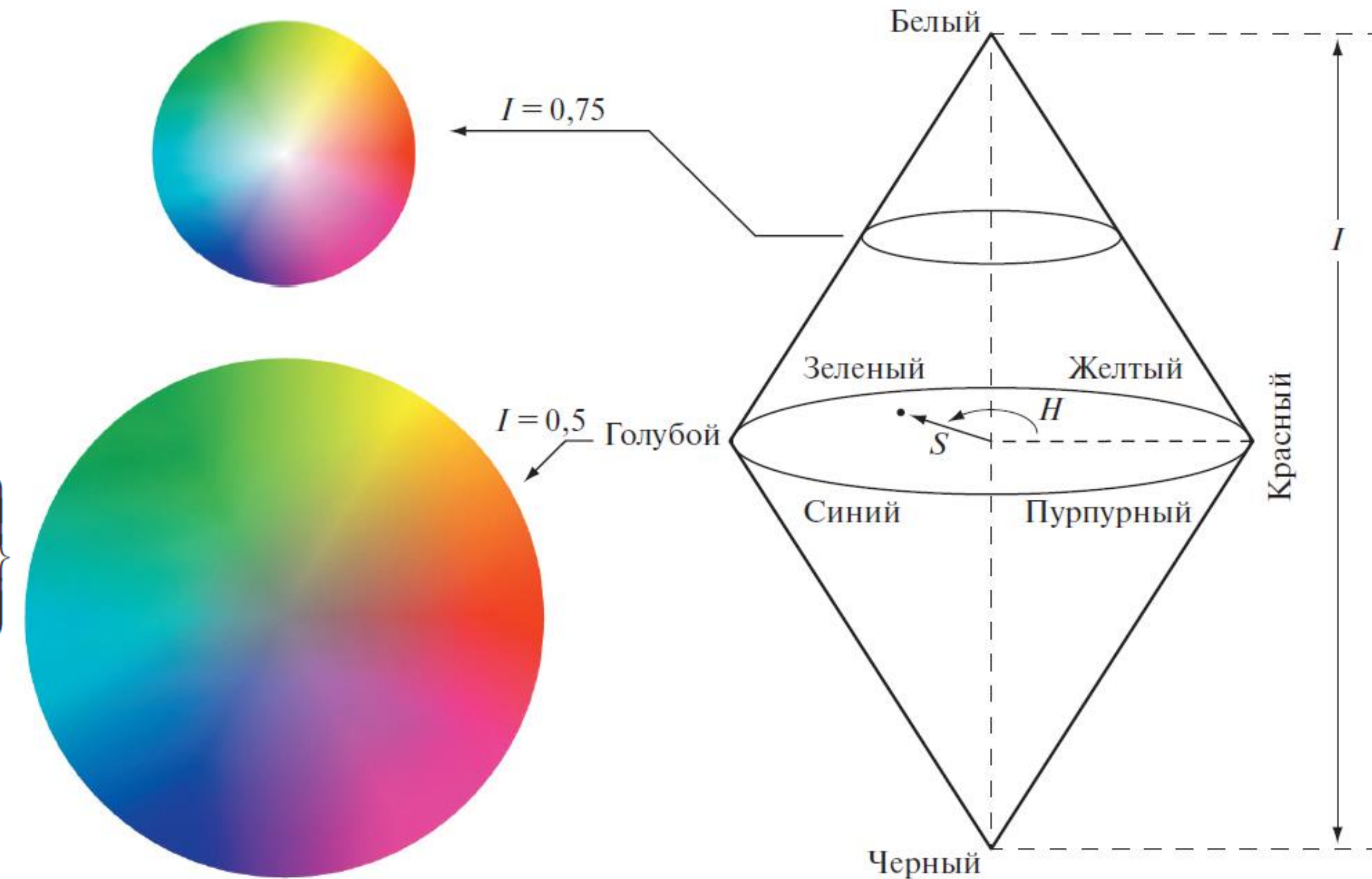
- Насыщенность

$$S = 1 - \frac{3}{(R+G+B)} [\min(R, G, B)]$$

- Интенсивность

$$I = \frac{1}{3}(R+G+B)$$

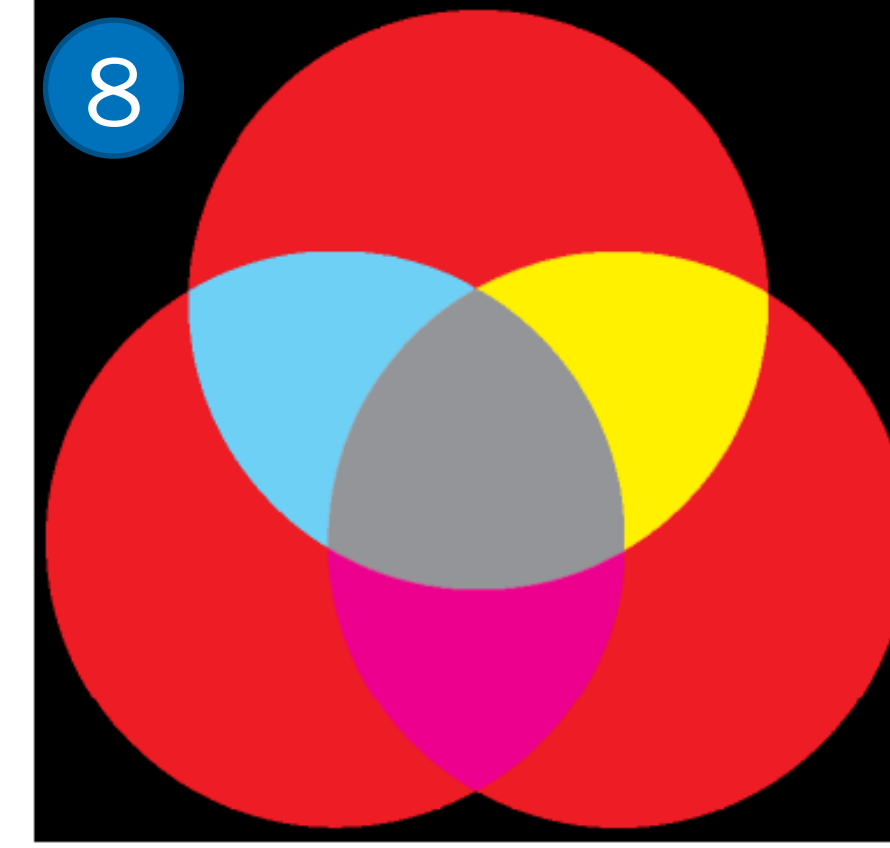
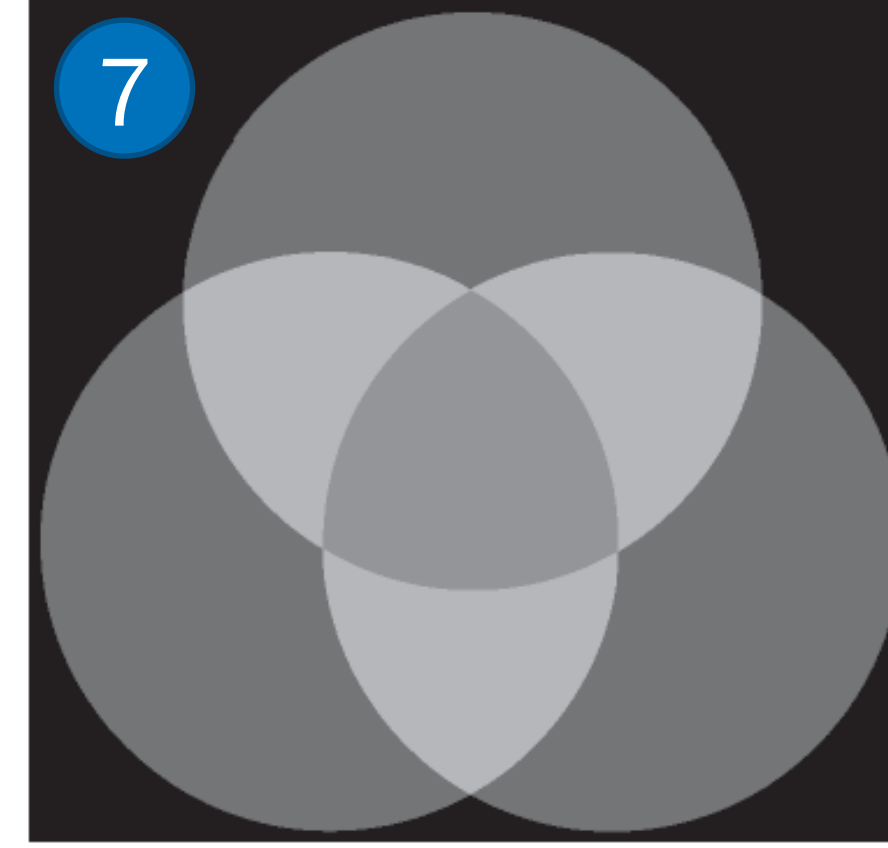
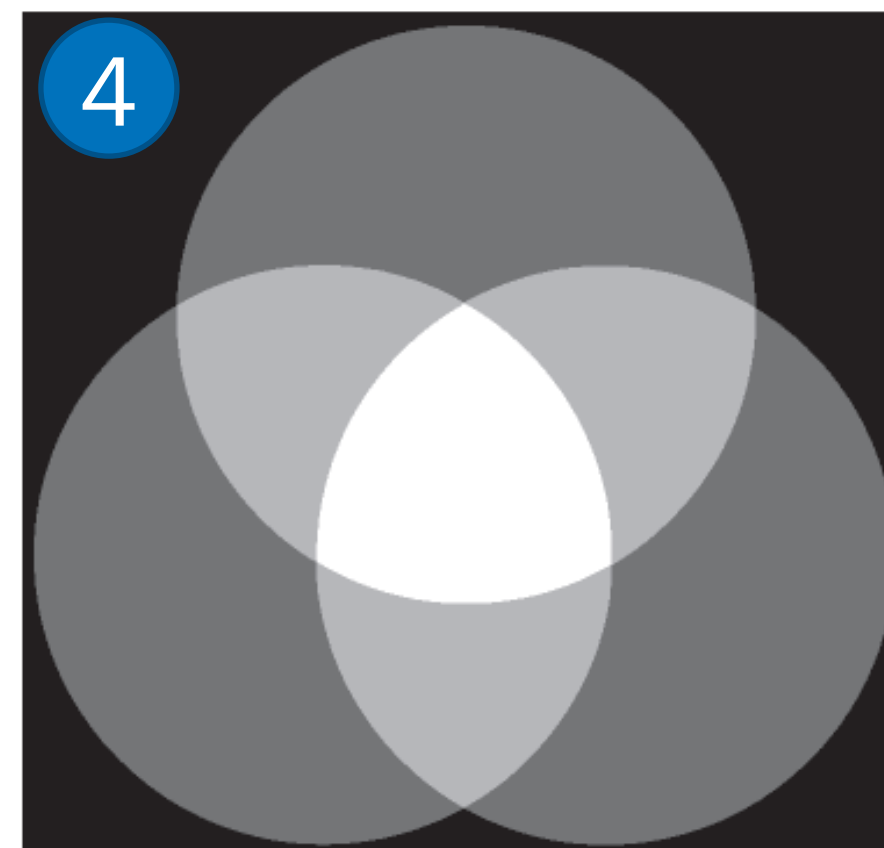
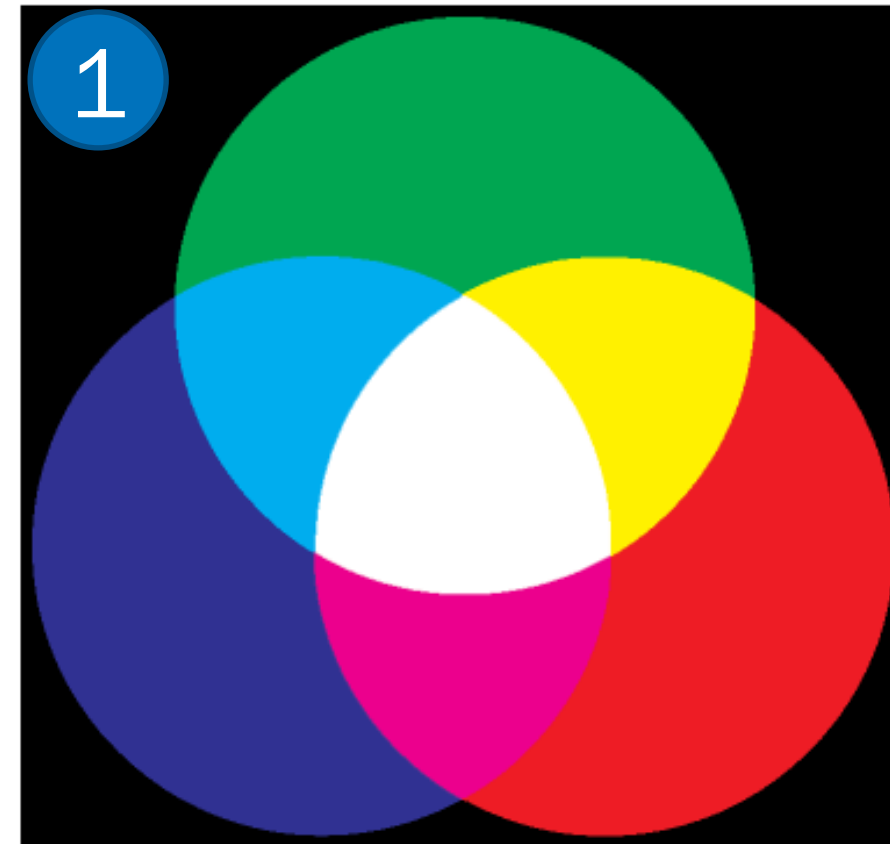
Цветовой тон и насыщенность в цветовой модели HSI



Обработка цветных изображений

Работа с HSI-изображениями

1. RGB-изображение
2. Цветовой тон
3. Насыщенность
4. Интенсивность
5. Модифицированный H
6. Модифицированная I
7. Модифицированная S
8. Результирующее RGB

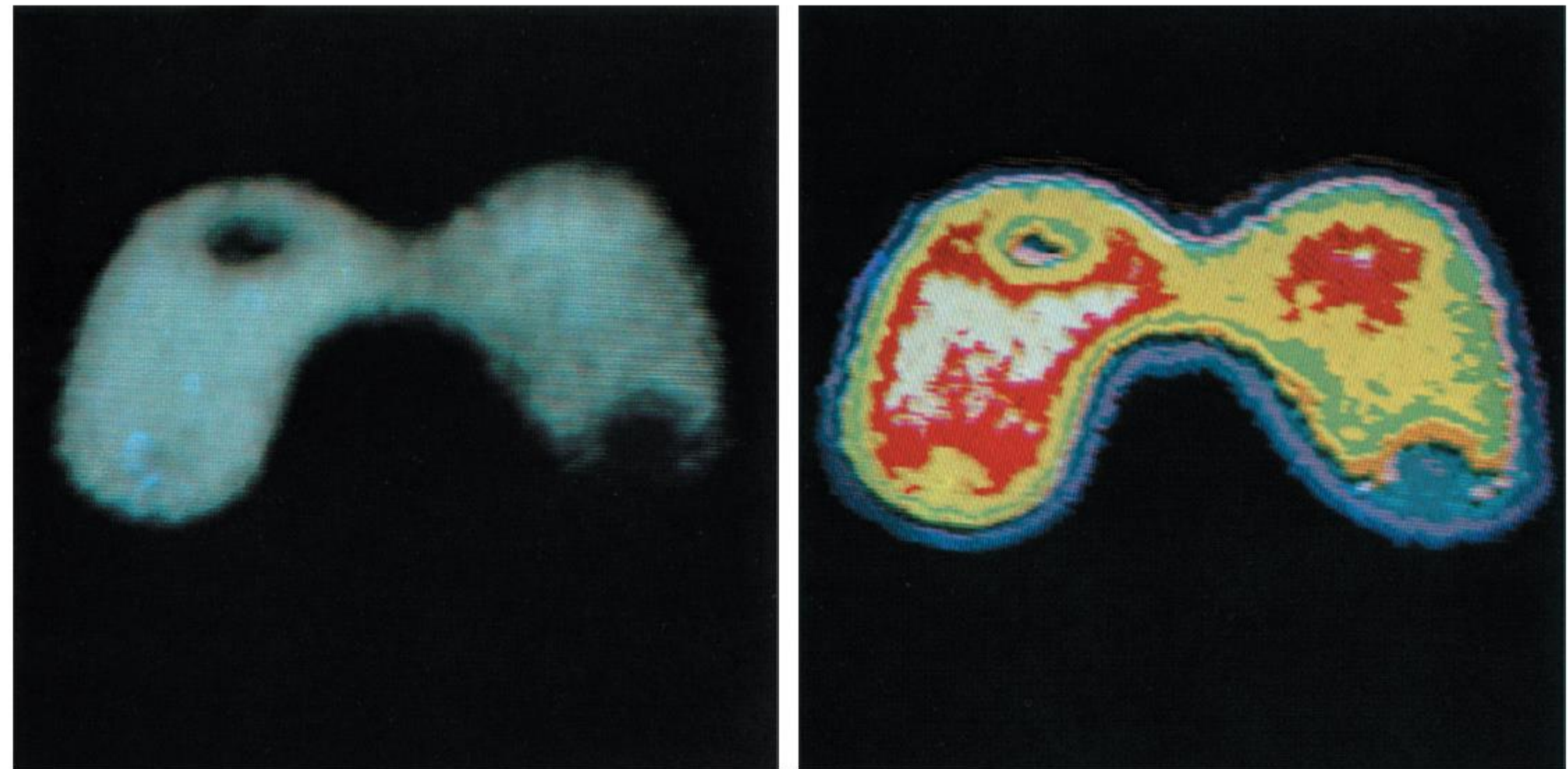


Обработка цветных изображений

Изображения в псевдоцветах



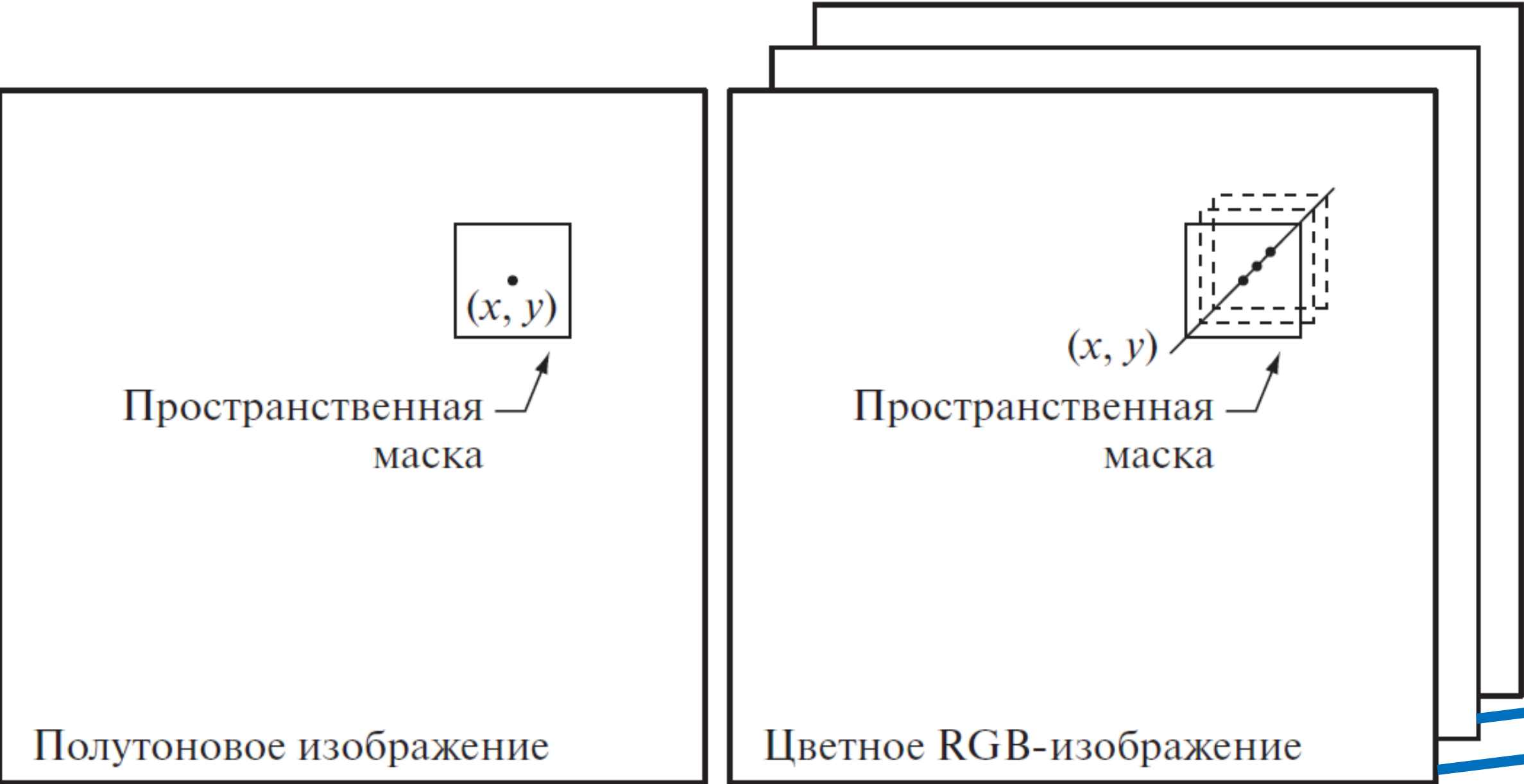
Монохромное изображение фантома щитовидной железы. Результат квантования по яркости (по плотности) на восемь цветов



Обработка цветных изображений

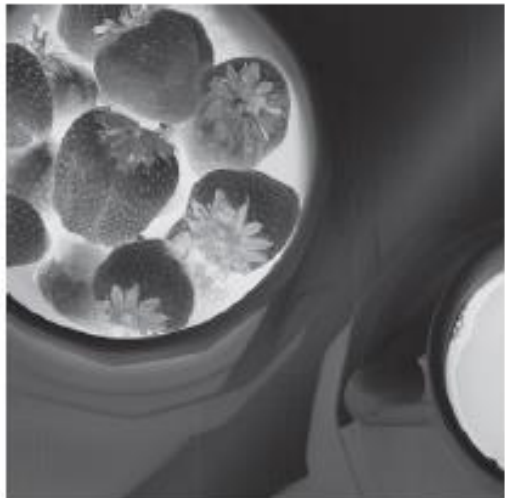
Принципы обработки цветных изображений

Пространственные маски для полутоновых и цветных RGB-изображений



Цветное изображение

Цветное изображение и его компоненты, соответствующие различным цветовым пространствам



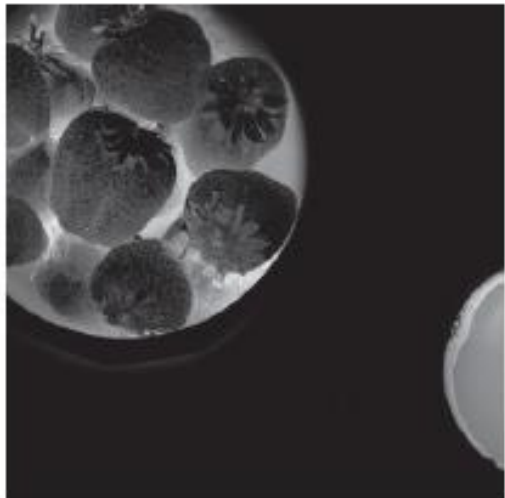
Голубой (C)



Пурпурный (M)



Желтый (Y)



Черный (K)



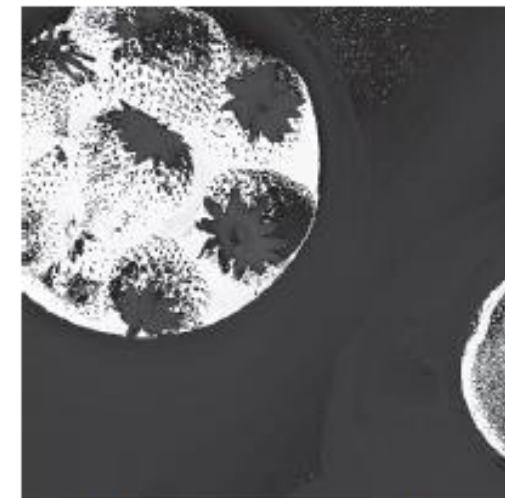
Красный (R)



Зеленый (G)



Синий (B)



Цветовой тон (H)



Насыщенность (S)



Интенсивность (I)

Обработка цветных изображений

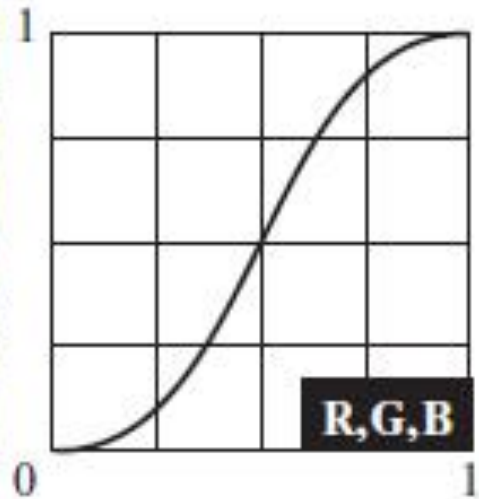
Яркостная и цветовая коррекция

Яркостная коррекция для малококонтрастного и светлого изображений



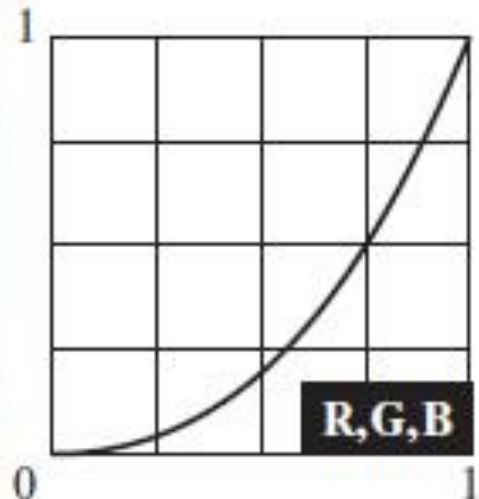
Малококонтрастное изображение

Результат коррекции

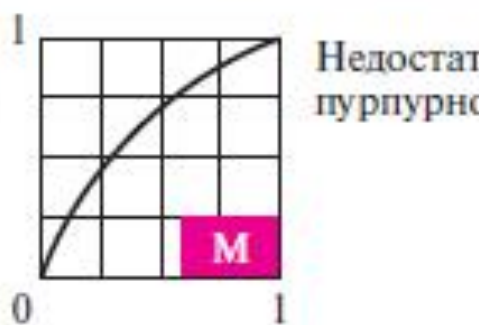
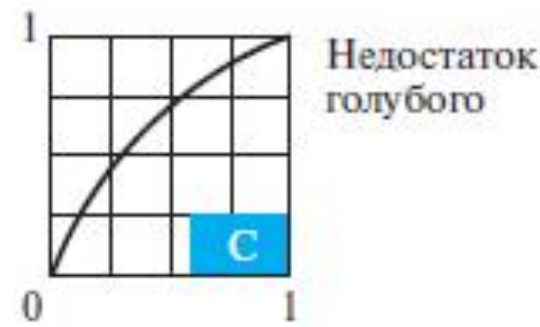
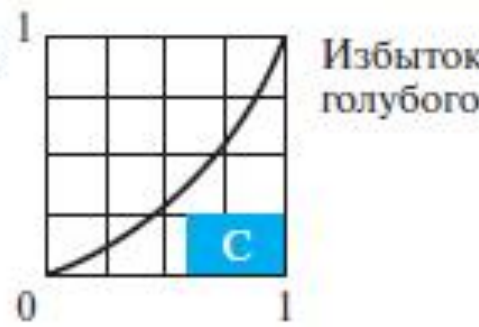
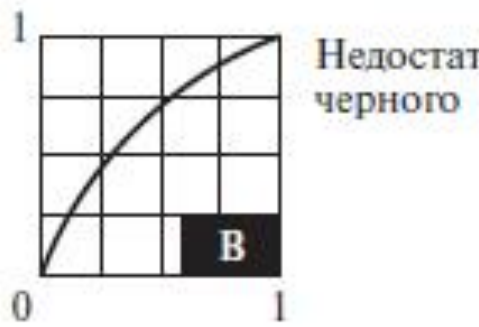
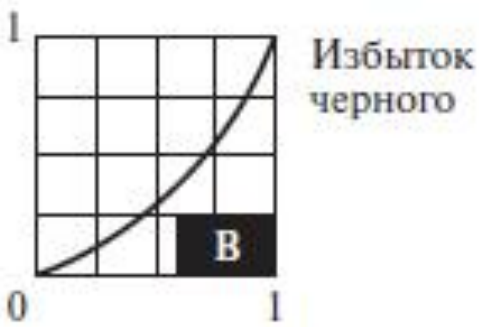


Светлое изображение

Результат коррекции



Цветовая коррекция для CMYK-изображений



Обработка цветных изображений

Сегментация, основанная на цвете

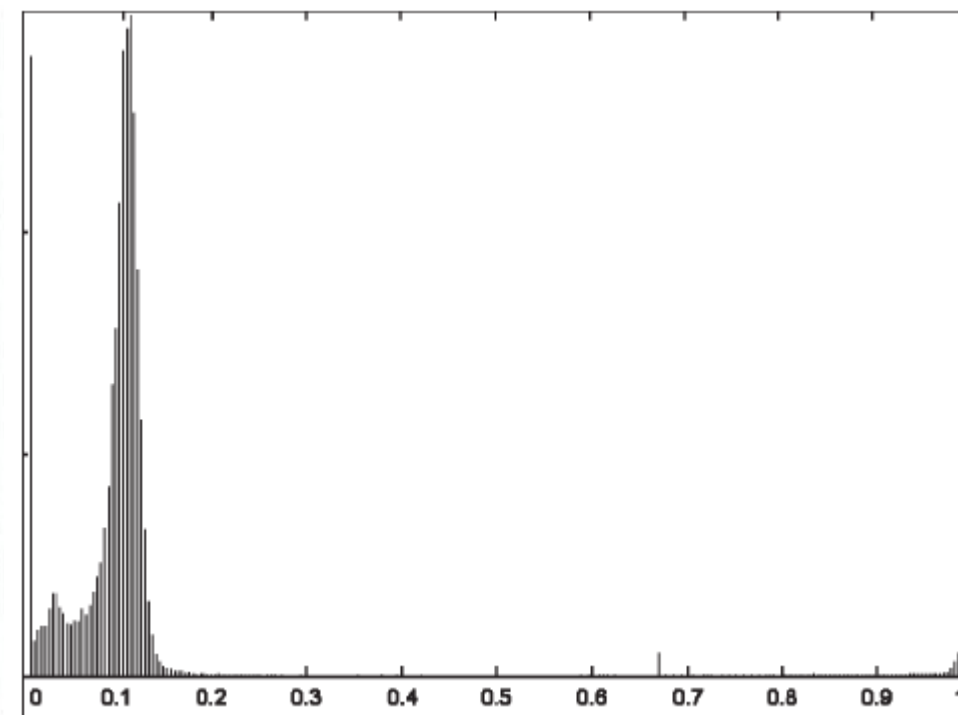
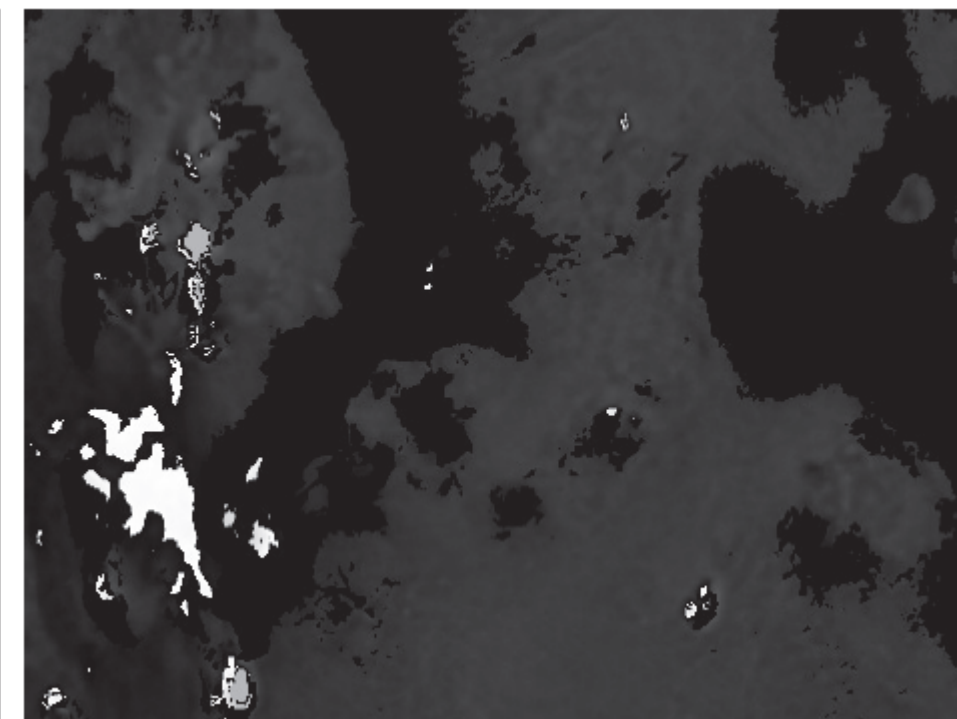
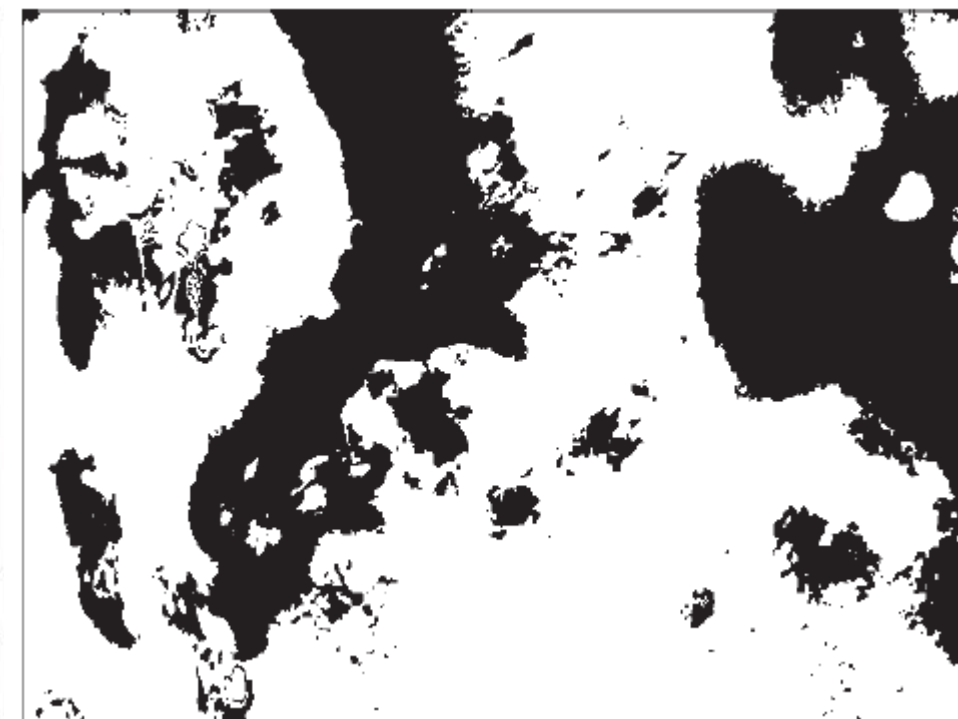
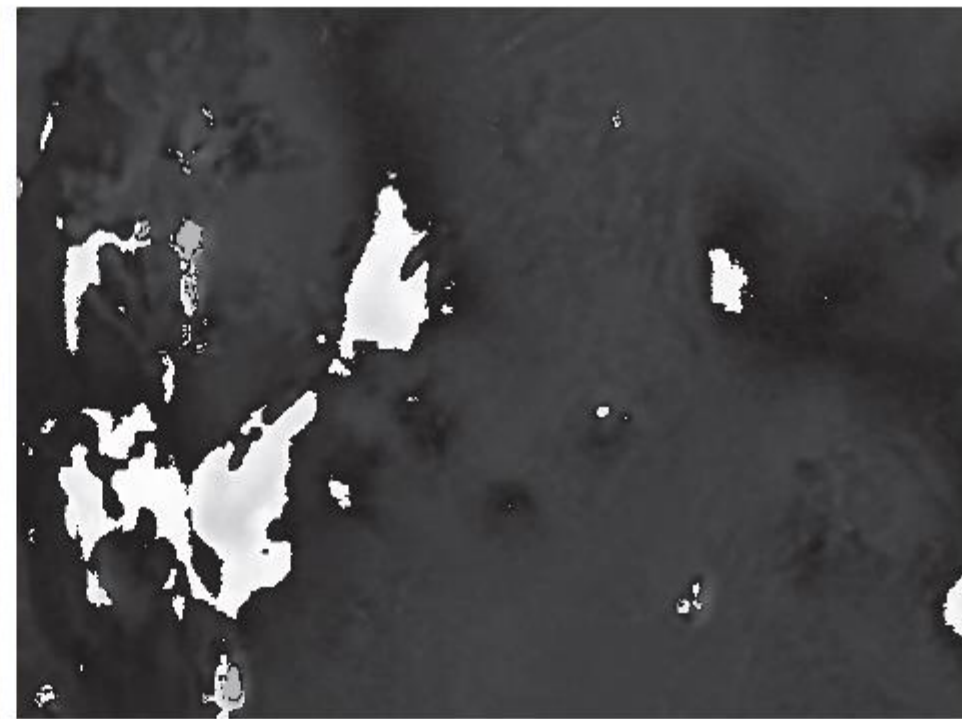
Пример сегментации в пространстве HSI

Пример сегментации в пространстве RGB

Hue

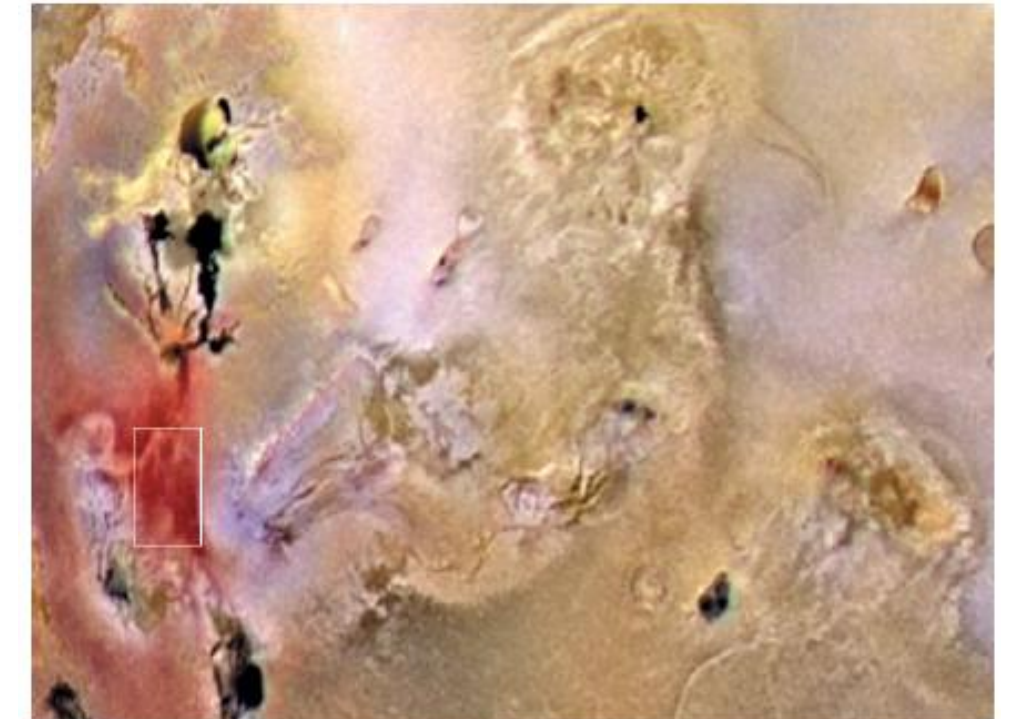
Mask

Hue * Mask



Saturation

Intensity



Морфологическая обработка

Начальные сведения

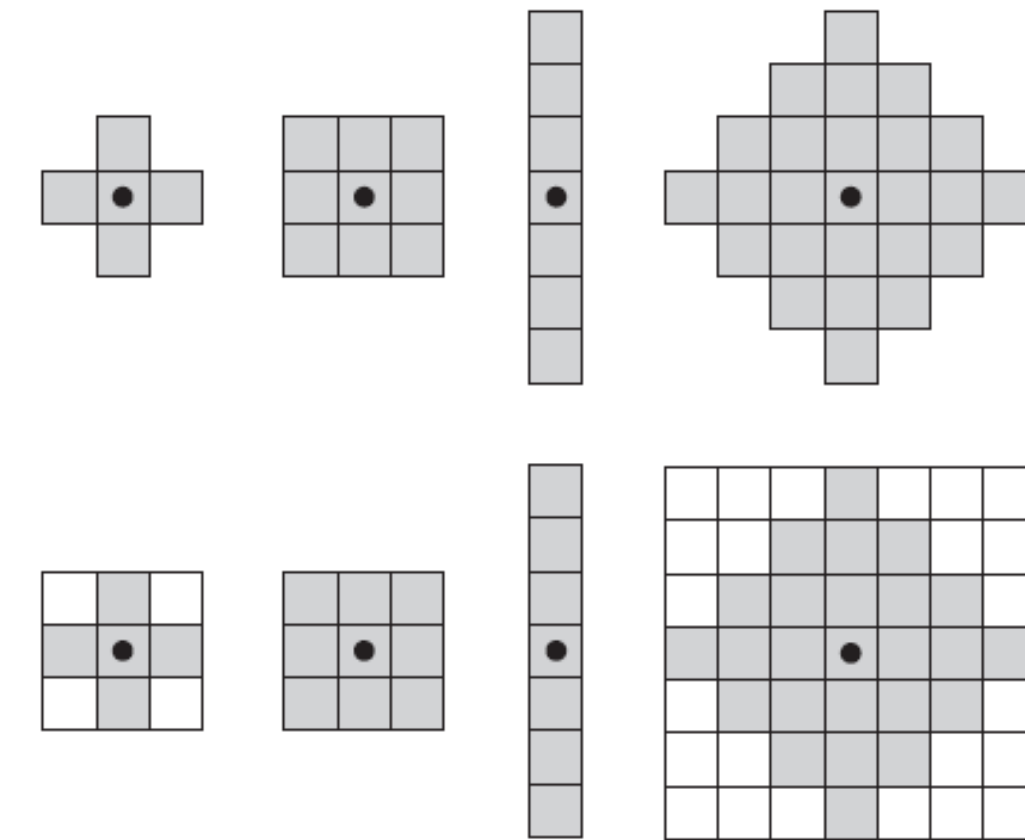
Математическая морфология:

- Инструмент для извлечения компонент изображения, необходимых для его описания/представления
- Включает методы морфологической фильтрации, утончения и усечения

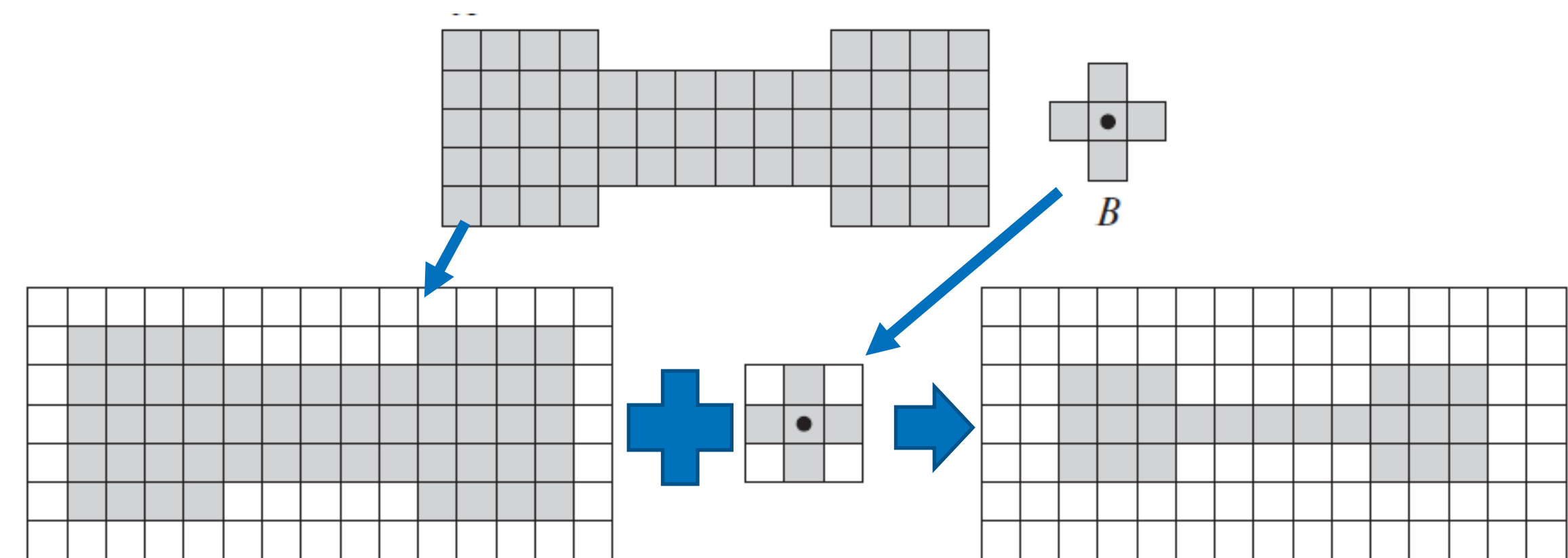
Основные элементы:

- Структурообразующие множества (примитивы)
- Функциональные операции (центральное отражение, параллельный перенос, и т.д.)

Пример примитивов и их преобразование в массив



Пример обработки с помощью примитива



Морфологическая обработка

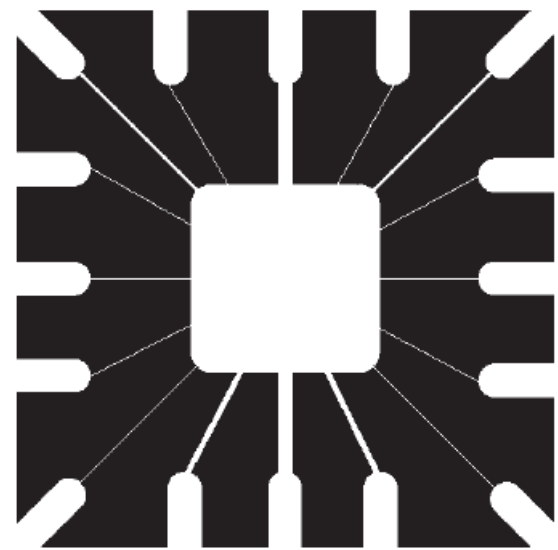
Эрозия

Эрозия:

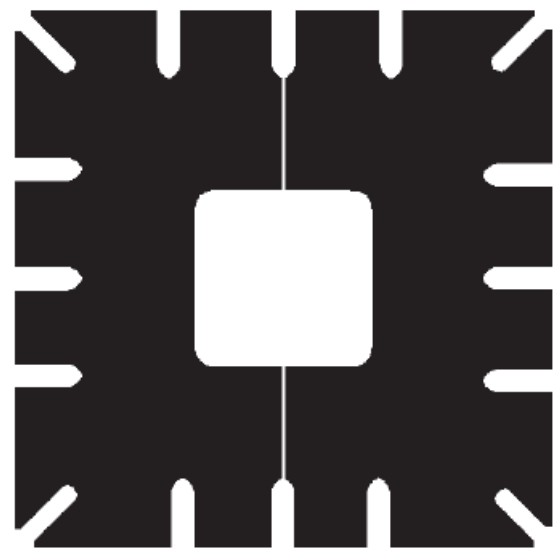
$$A \ominus B = \{z | (B)_z \subseteq A\}$$

- множество всех таких точек z , при сдвиге в которые множество B целиком содержится в A
- A – исходный объект
- B – примитив

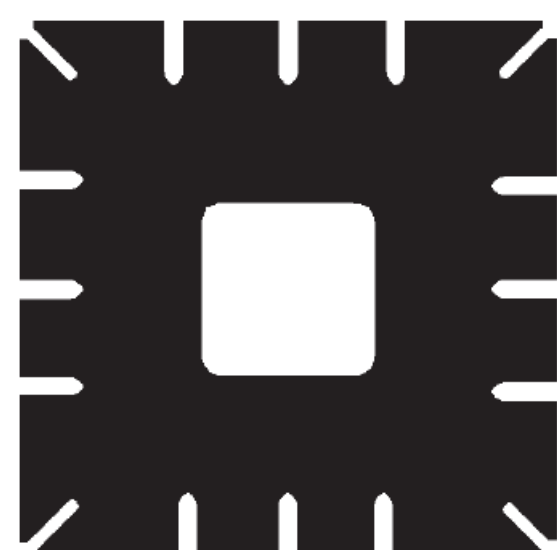
Двоичное изображение
маски микросхемы



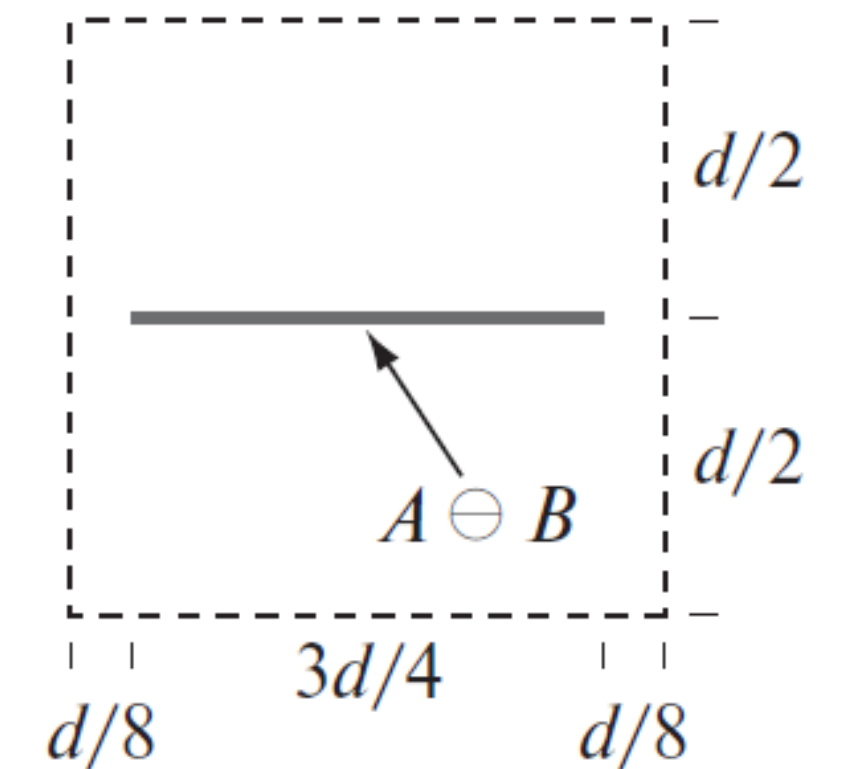
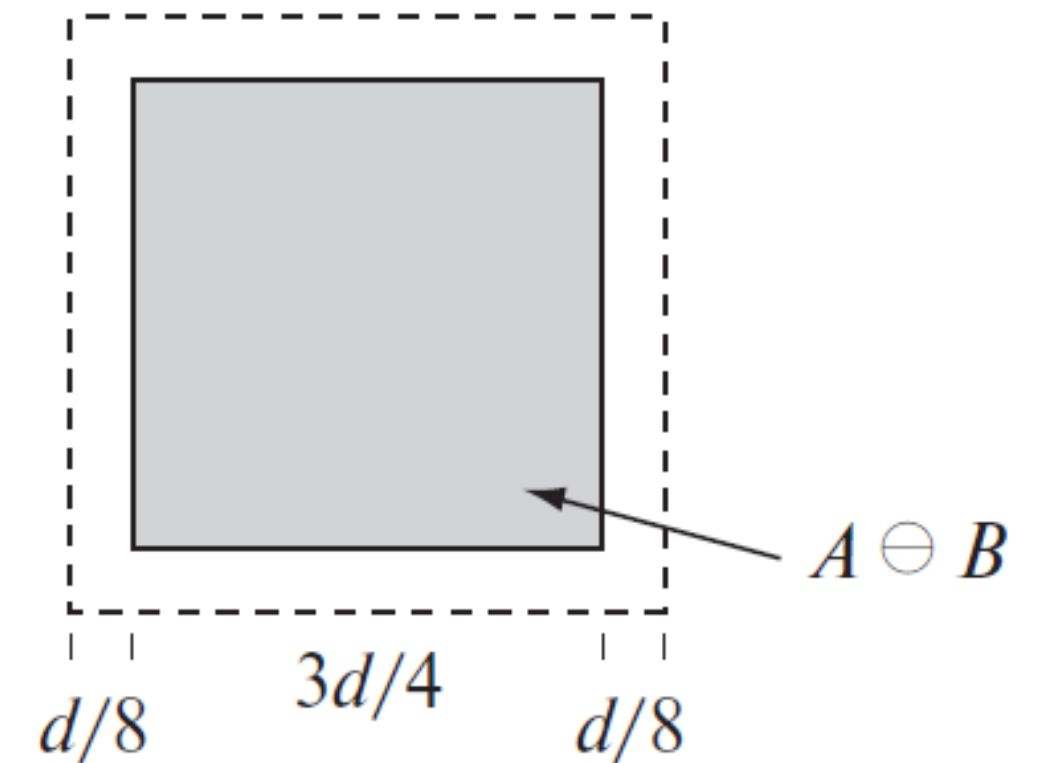
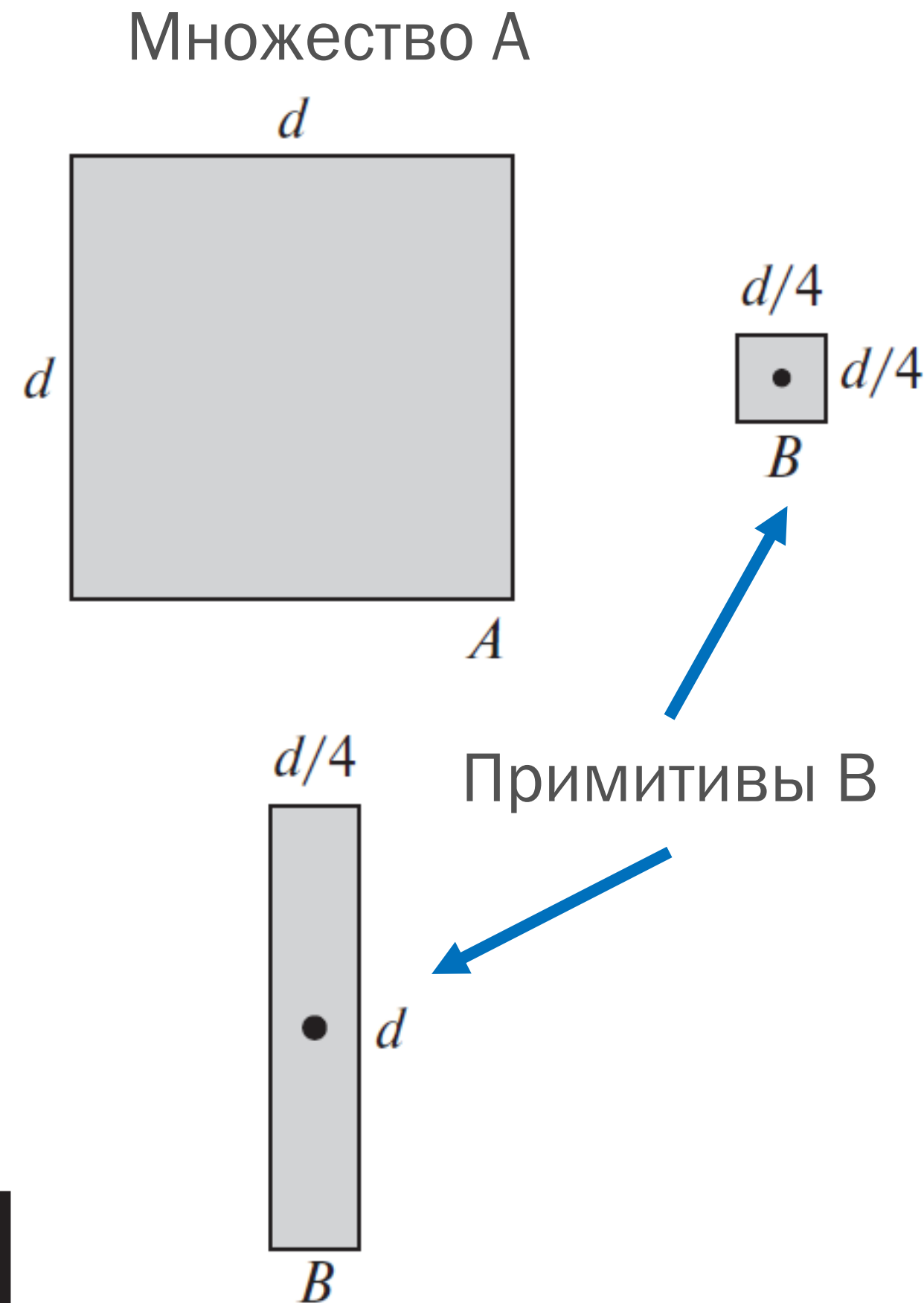
Эрозия по
квадрату 11x11



Эрозия по
квадрату 15x15



Эрозия по
квадрату 45x45



Результаты
эрозии

Морфологическая обработка

Дилатация

Дилатация:

$$A \oplus B = \{z | (\hat{B})_z \cap A \neq \emptyset\}$$

- множество всех таких смещений z , при которых множества \hat{B} и A совпадают по меньшей мере в одном элементе

Historically, certain computer programs were written using only two digits rather than four to define the applicable year. Accordingly, the company's software may recognize a date using "00" as 1900 rather than the year 2000.

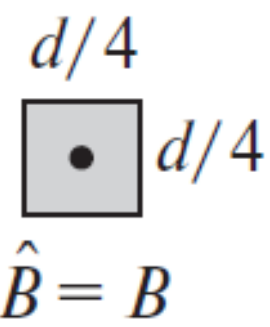
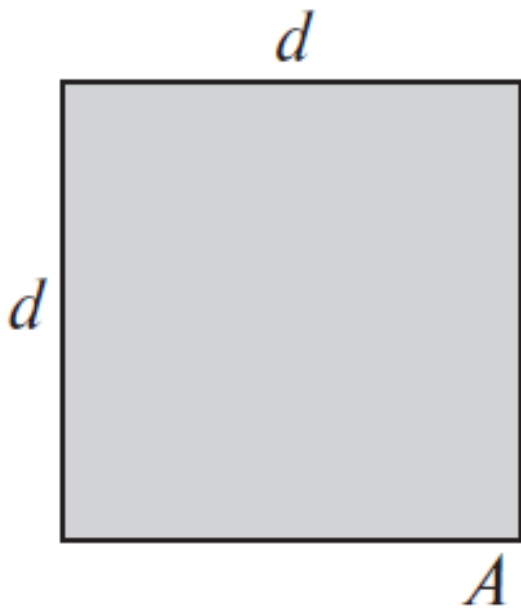


Historically, certain computer programs were written using only two digits rather than four to define the applicable year. Accordingly, the company's software may recognize a date using "00" as 1900 rather than the year 2000.



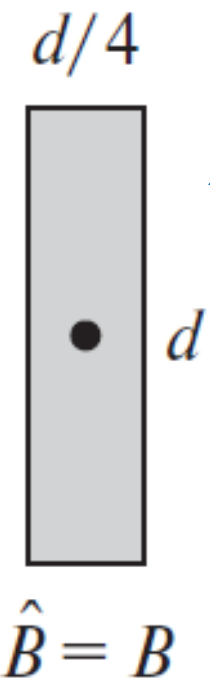
| | | |
|---|---|---|
| 0 | 1 | 0 |
| 1 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 0 |

Множество A

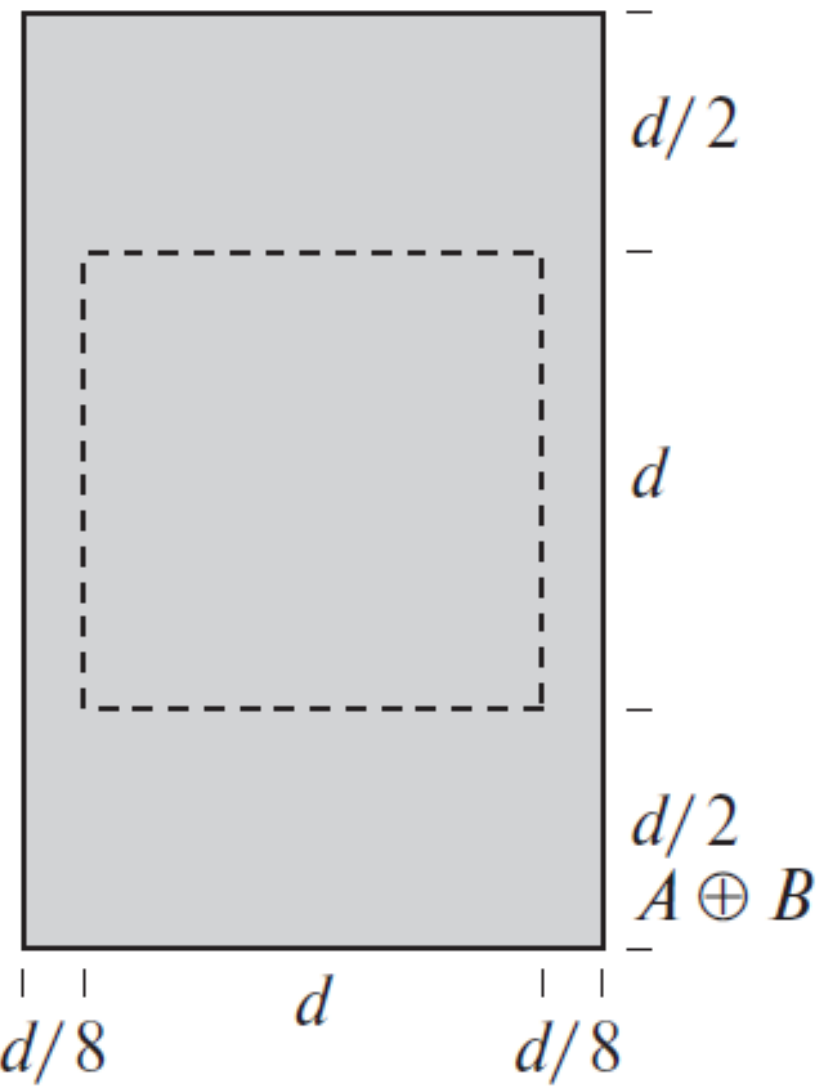
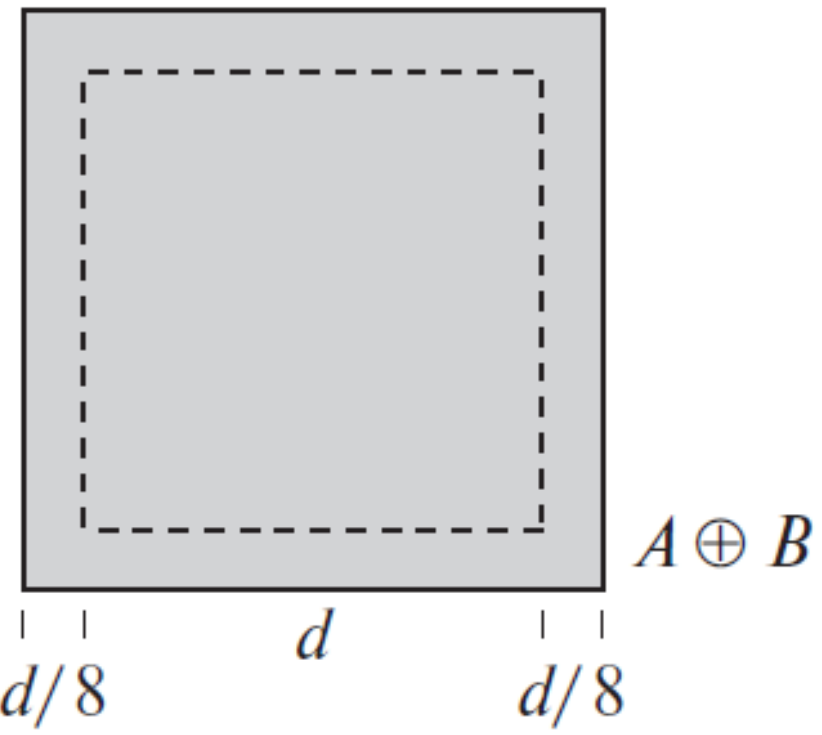


$\hat{B} = B$

Примитивы B



$\hat{B} = B$



Результаты дилатации

Морфологическая обработка

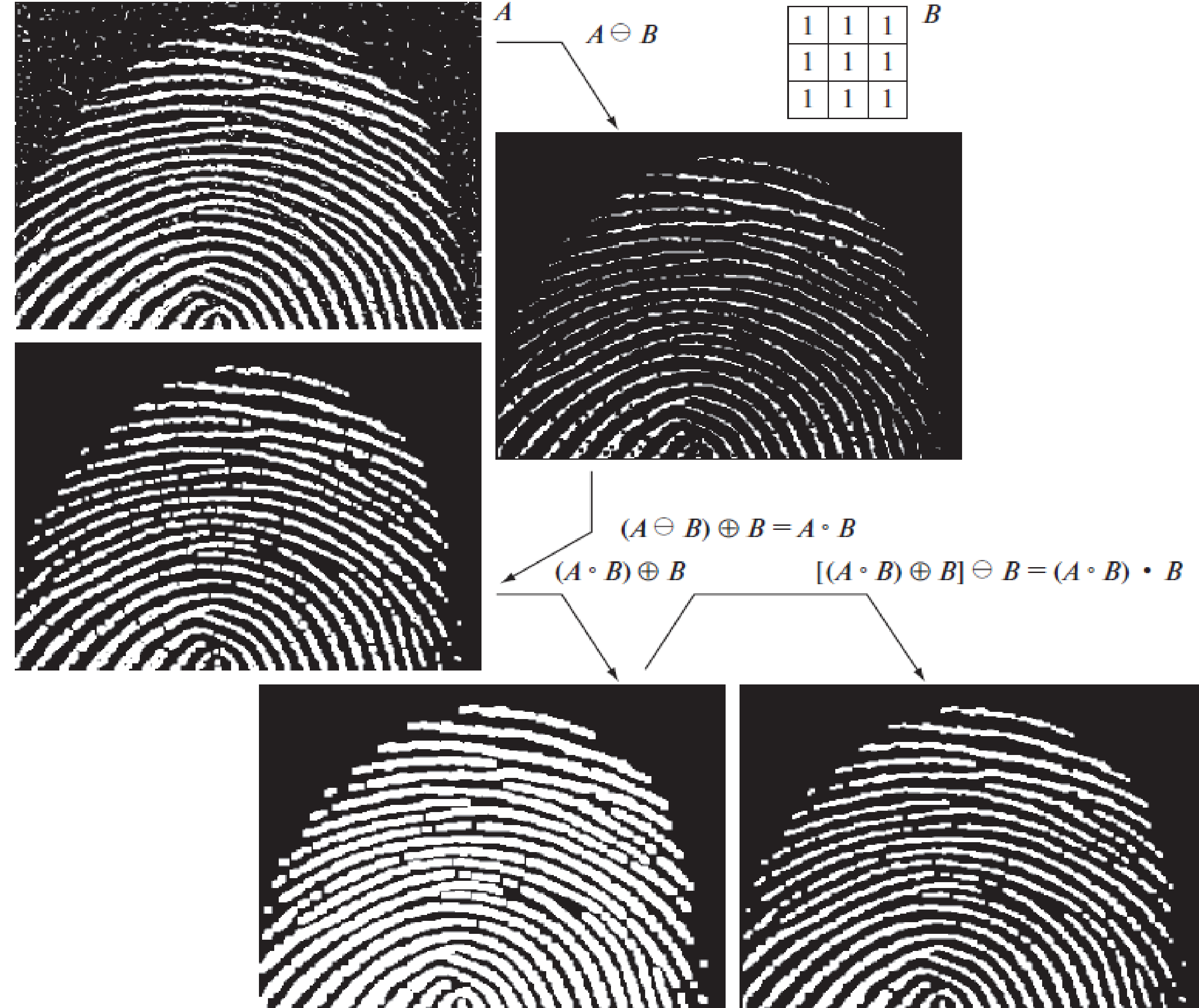
Размыкание и замыкание

Размыкание:

$$A \oplus B = \left\{ z \mid (\hat{B})_z \cap A \neq \emptyset \right\}$$

- строится как эрозия A по B, результат которой затем подвергается дилатации по тому же примитиву B

Замыкание: $A \bullet B = (A \oplus B) \ominus B$

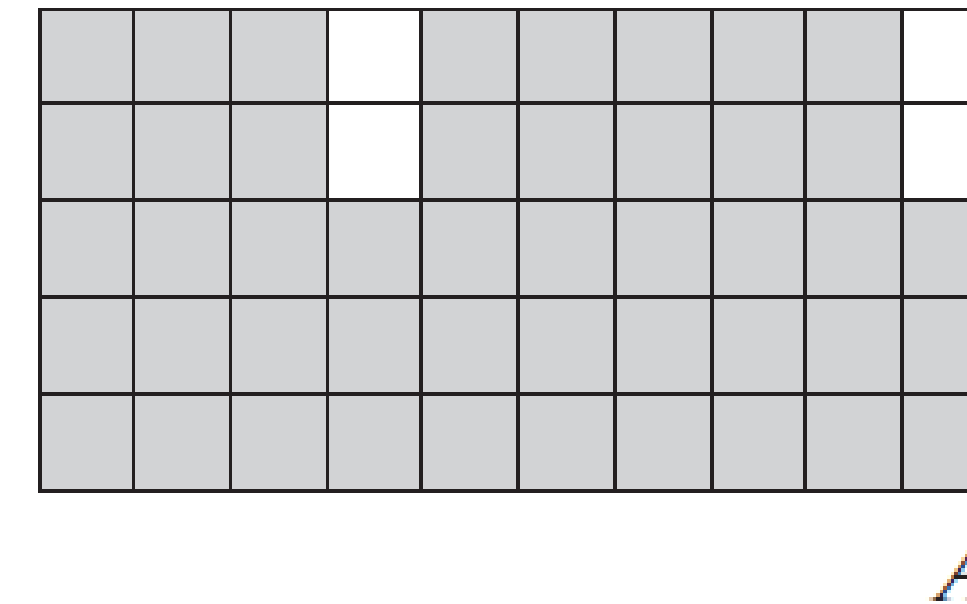
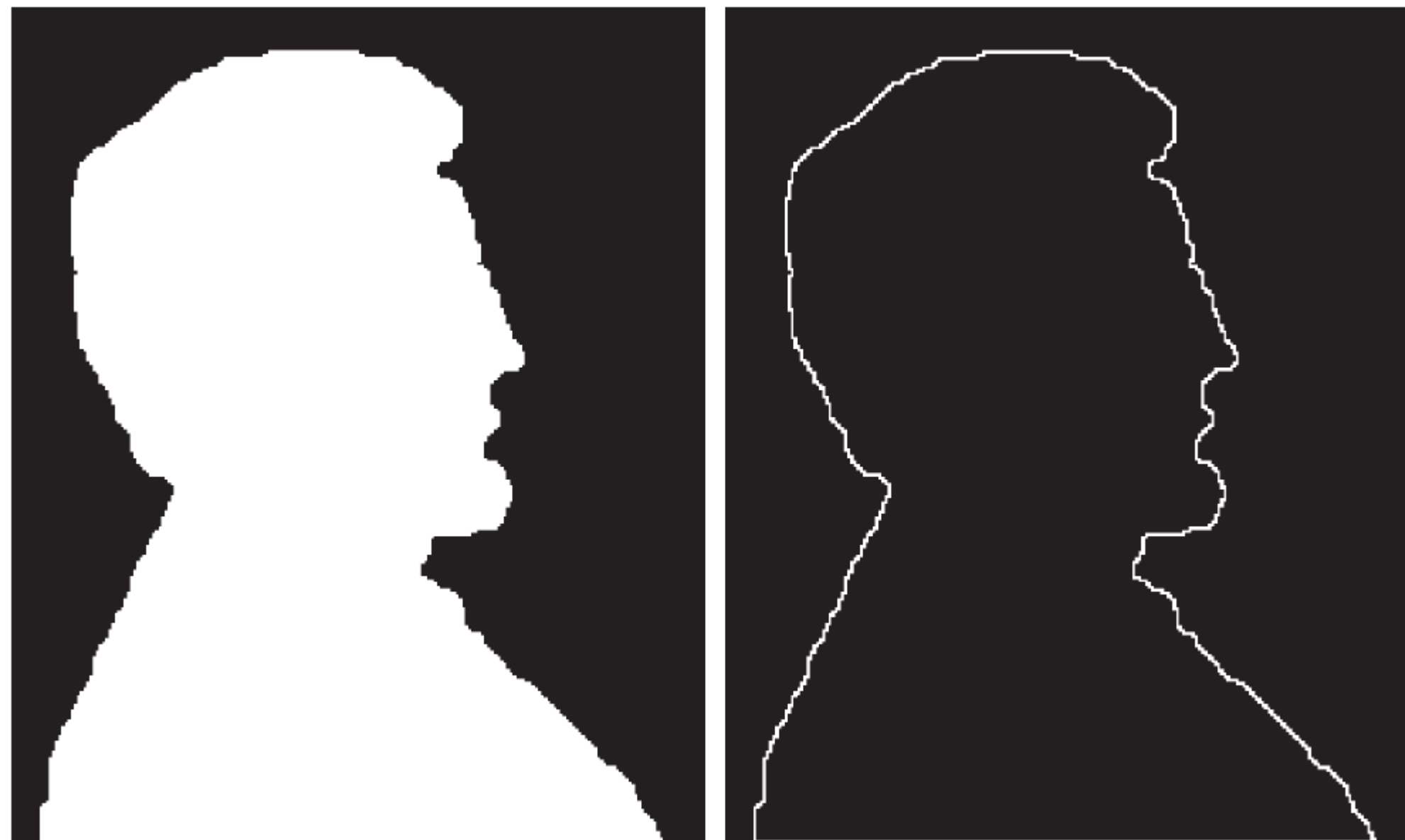


Основные морфологические алгоритмы

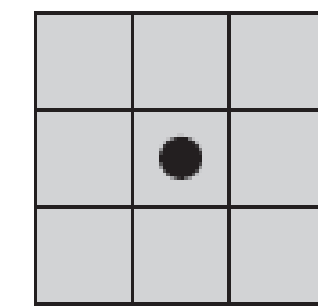
Выделение границ

$$\beta(A) = A \setminus (A \ominus B)$$

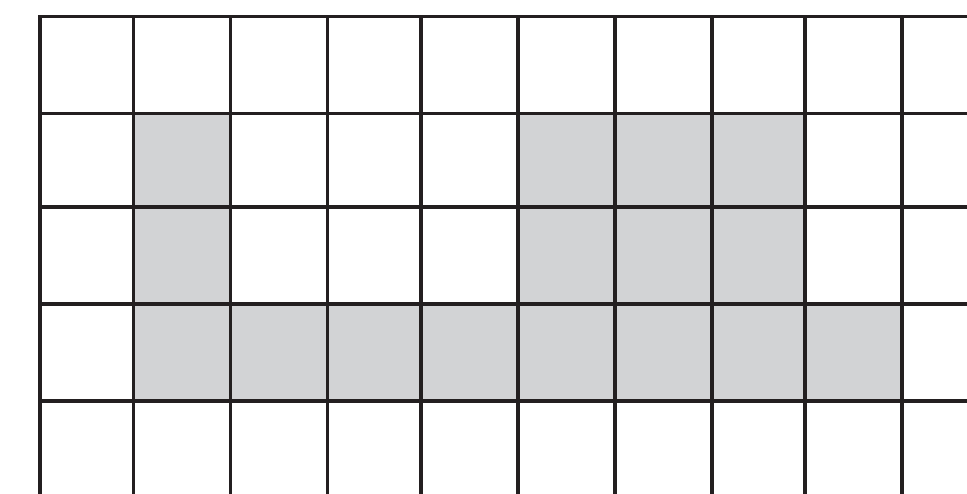
- Граница множества A , которую будем обозначать $\beta(A)$, может быть выделена путем выполнения сначала операции эрозии A по B , а затем получения разностного множества между A и результатом его эрозии



A

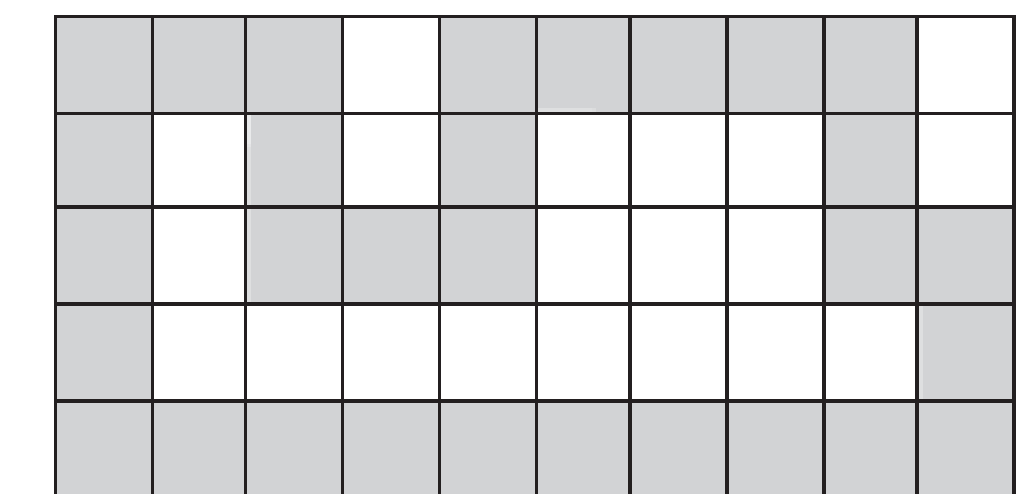


B



$A \ominus B$

Эрозия A по B



$\beta(A)$

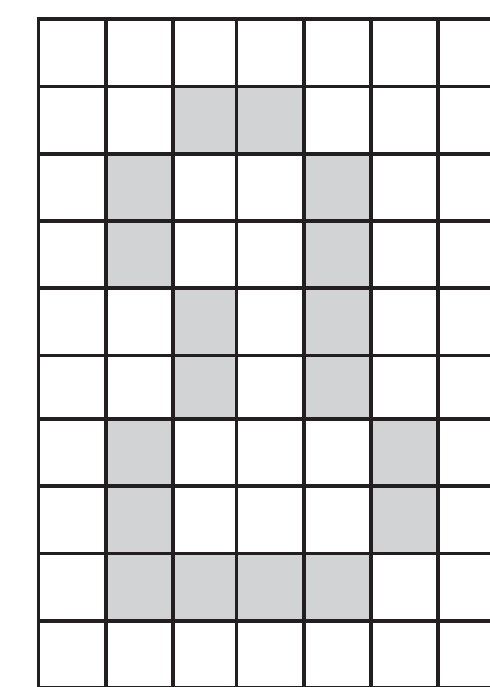
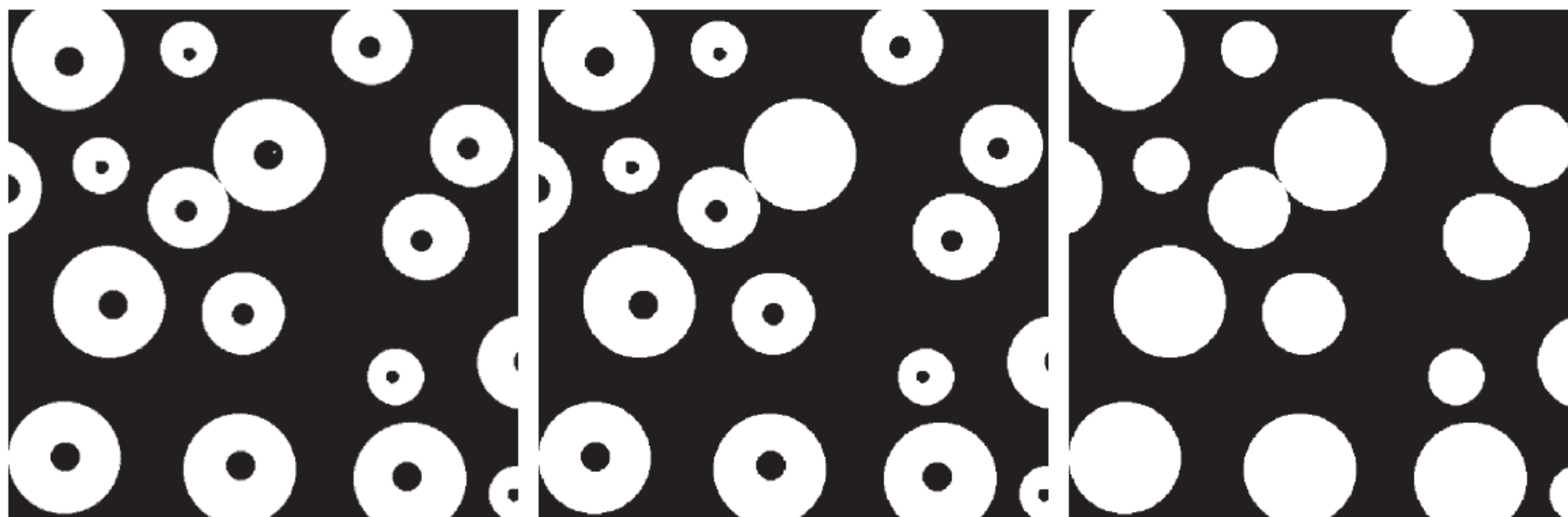
Граница

Основные морфологические алгоритмы

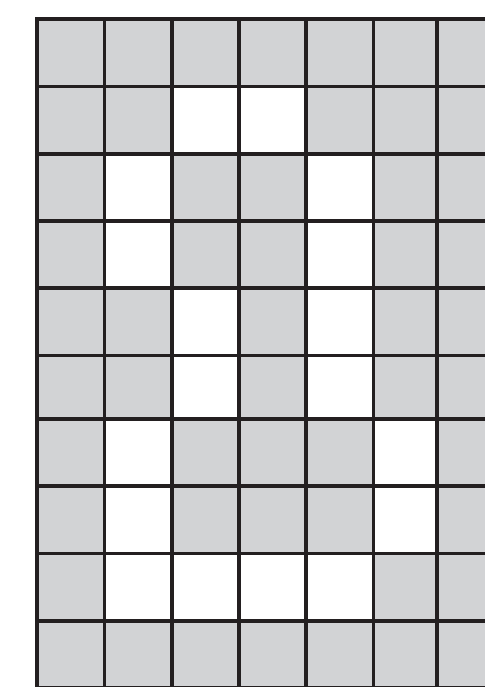
Заполнение дырок

- Дырку - область фона, окруженная связным бордюром из элементов переднего плана
- Задача – начав с заданной точки внутри каждой дырки, заполнить все дырки единичными значениями
- Заполнение дырок единицами

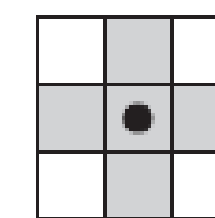
$$X_k = (X_{k-1} \oplus B) \cap A^c \quad k = 1, 2, 3, \dots,$$



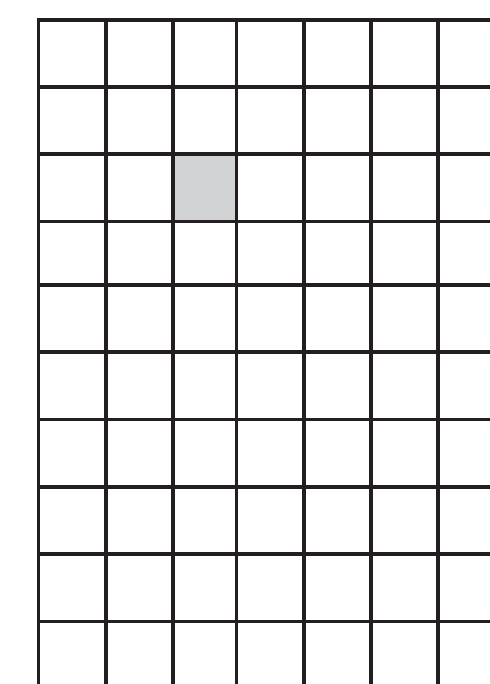
A



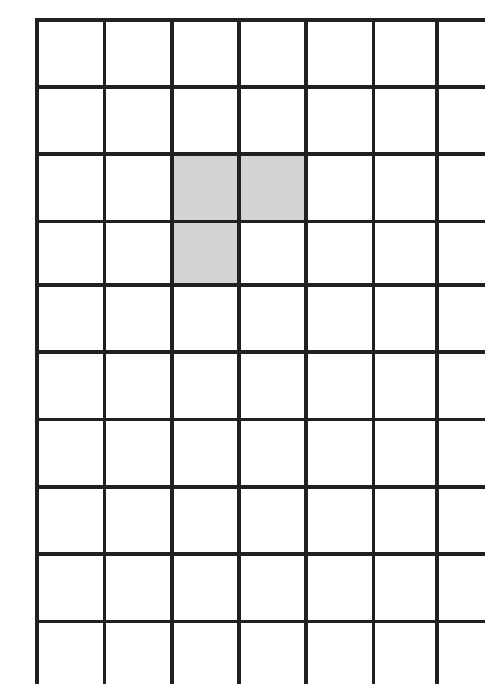
A^c



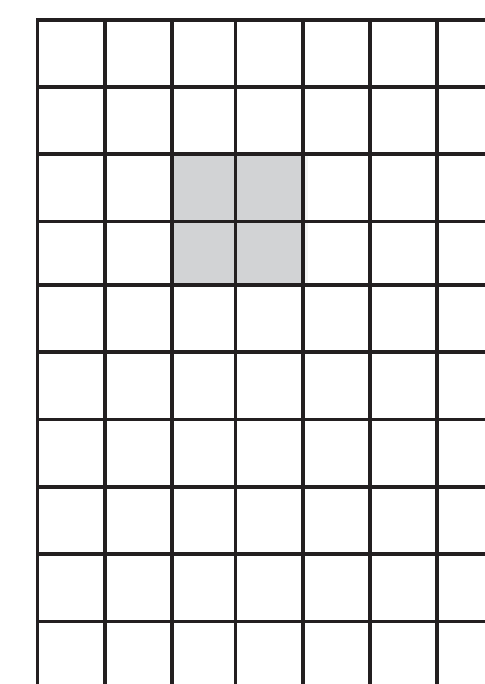
B



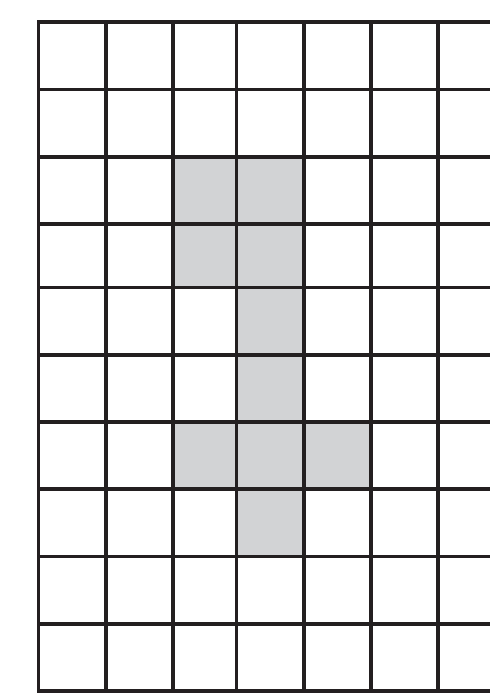
X₀



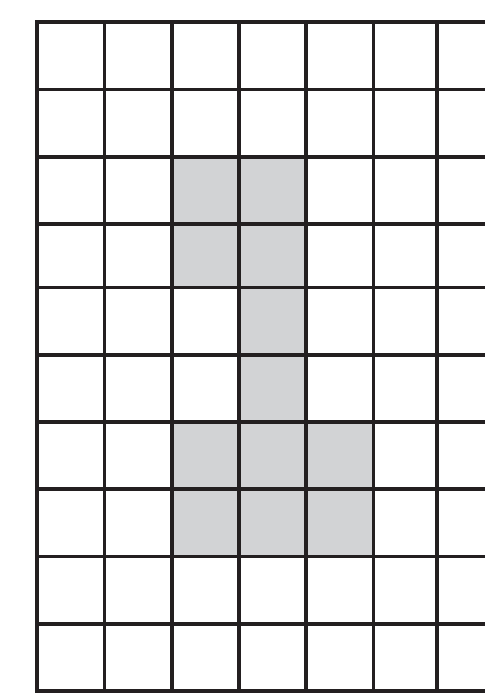
X₁



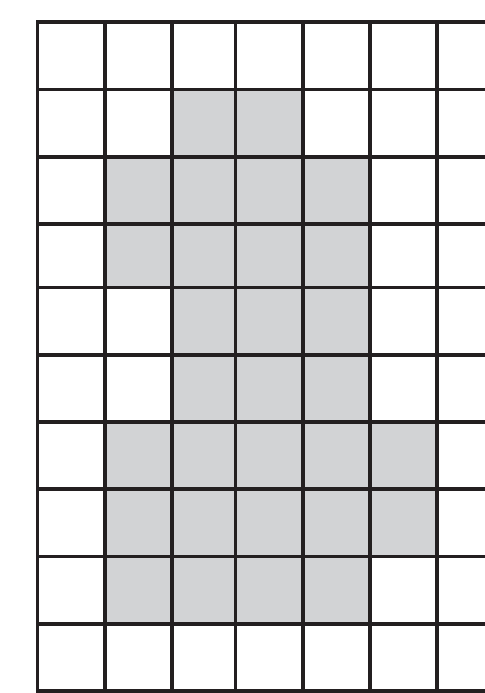
X₂



X₆



X₈



X₈ ∪ A

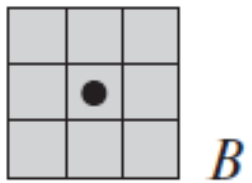
Основные морфологические алгоритмы

Выделение связанных компонент

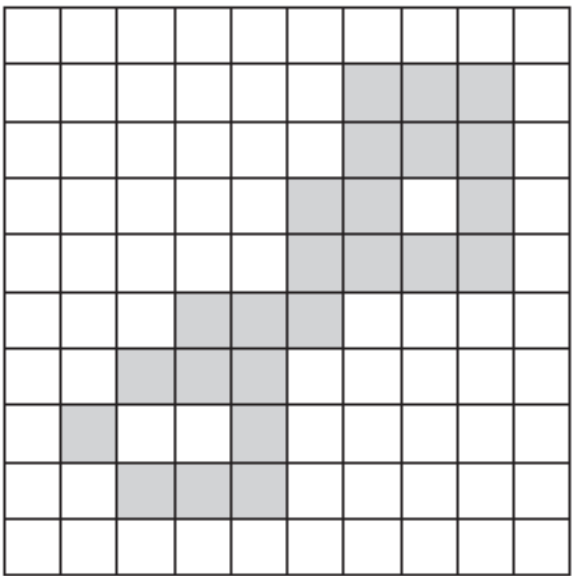
- Нахождение всех компонент связности
- Выполнение рекуррентного алгоритма

$$X_k = (X_{k-1} \oplus B) \cap A \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

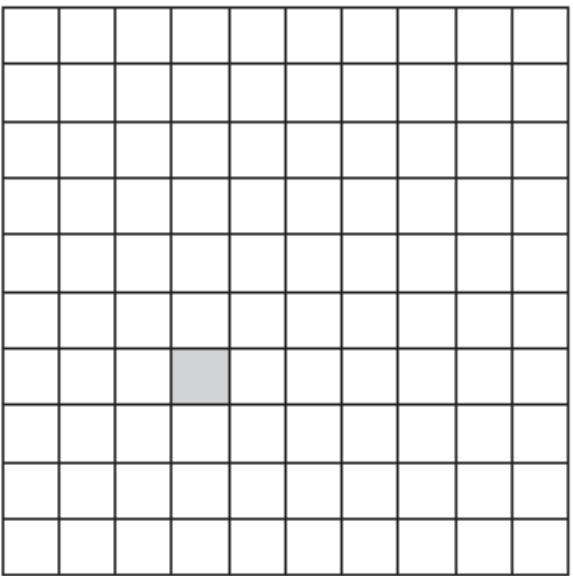
Массив, содержащий
множество с одной связной
компонентой



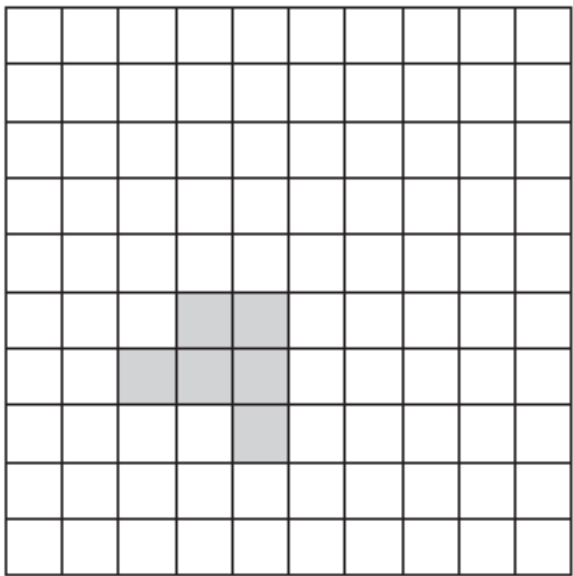
Результаты последовательных
шагов итерации



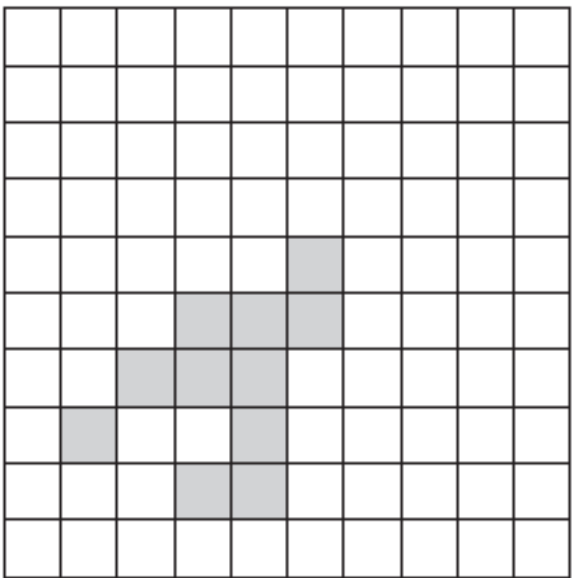
A



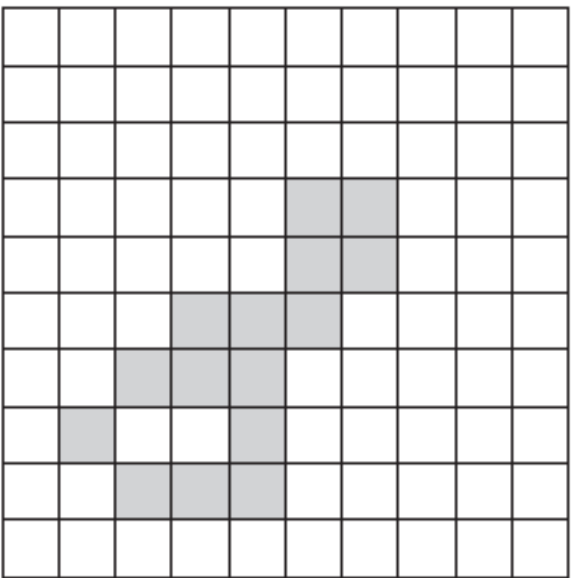
X₀



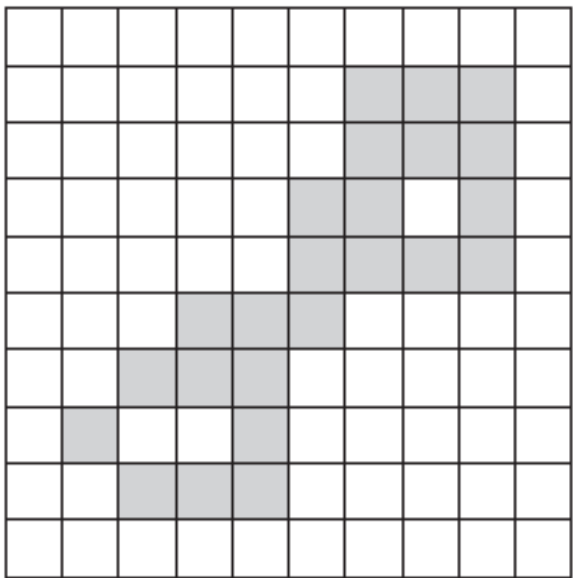
X₁



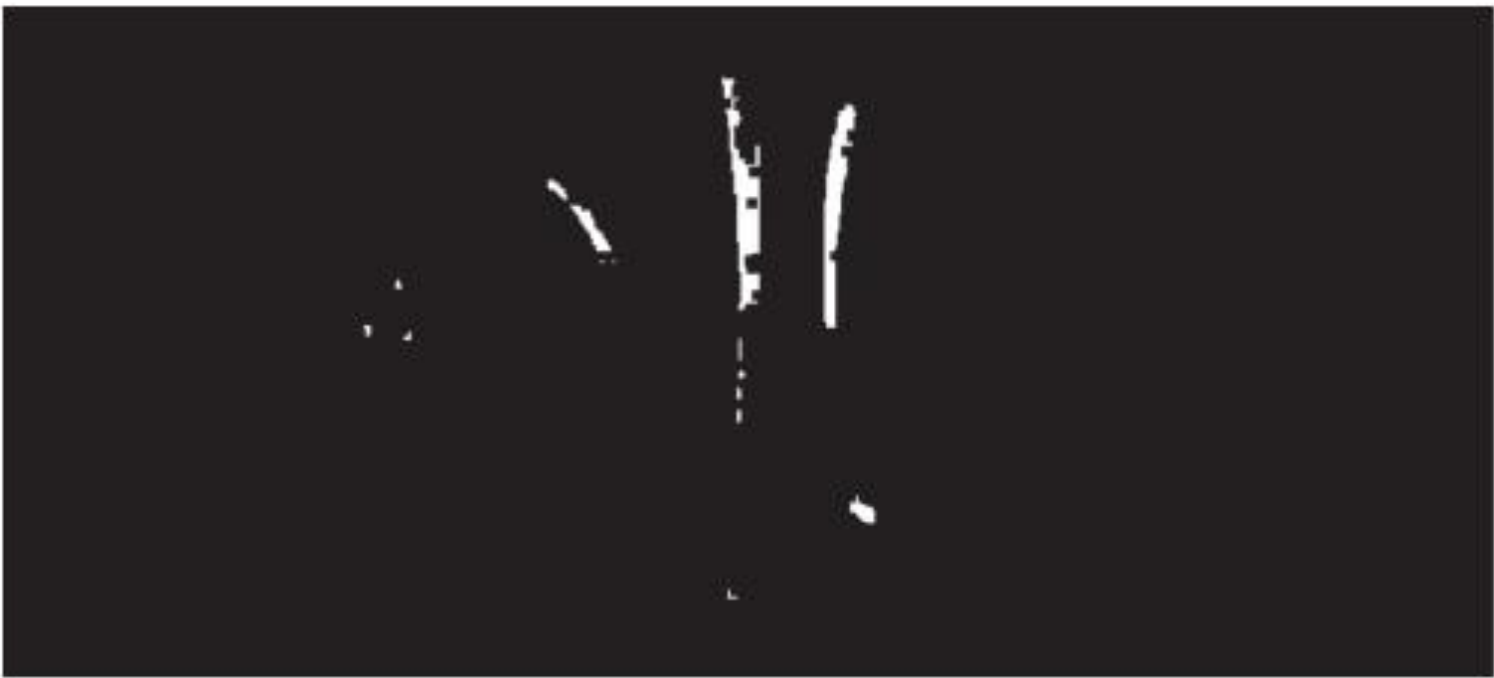
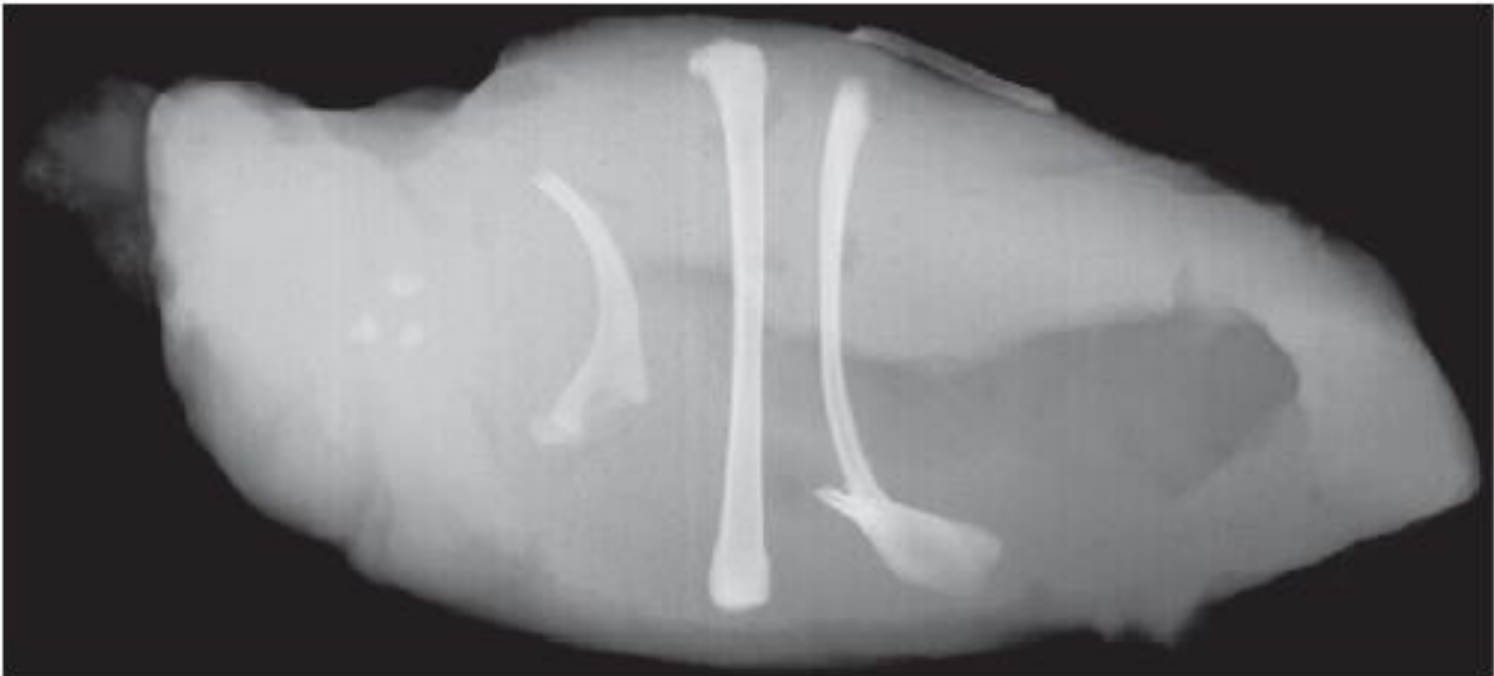
X₂



X₃



X₆



Число пикселей в
связных компонентах
изображения

| Номер связной компоненты | Число пикселей в связной компоненте |
|--------------------------------|---|
| 01 | 11 |
| 02 | 9 |
| 03 | 9 |
| 04 | 39 |
| 05 | 133 |
| 06 | 1 |
| 07 | 1 |
| 08 | 743 |
| 09 | 7 |
| 10 | 11 |
| 11 | 11 |
| 12 | 9 |
| 13 | 9 |
| 14 | 674 |
| 15 | 85 |

Основные морфологические алгоритмы

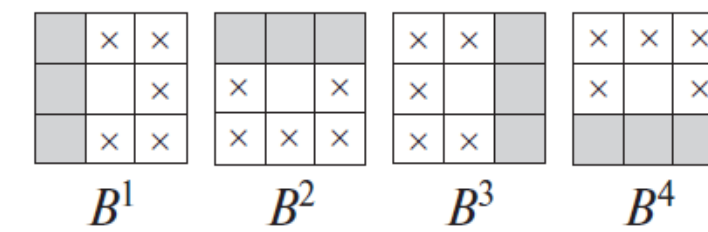
Выпуклая оболочка

- Выпуклая оболочка H произвольного множества S — это наименьшее выпуклое множество, содержащее S
- Метод состоит в итеративном применении к множеству A преобразования «попадание/пропуск» по примитиву B^1 и объединении с ранее полученным результатом

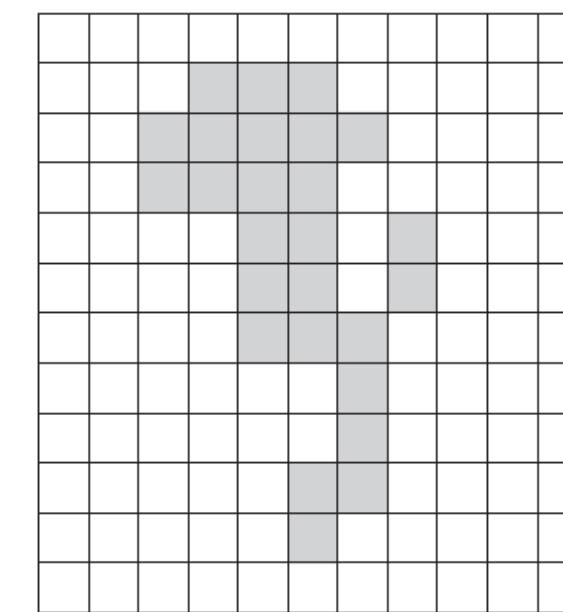
$$X_k^i = (X_{k-1}^i \circledast B^i) \cup X_{k-1}^i \quad i=1, 2, 3, 4 \quad \text{и} \quad k=1, 2, 3, \dots$$

Результаты сходимости процедуры для каждого из примитивов

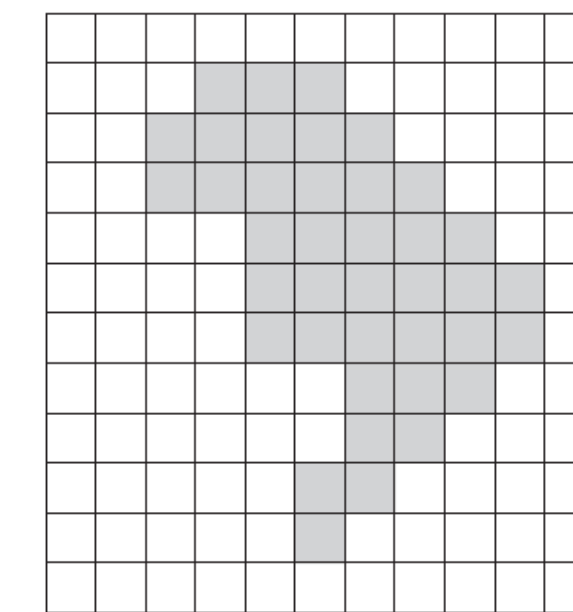
Используемые примитивы



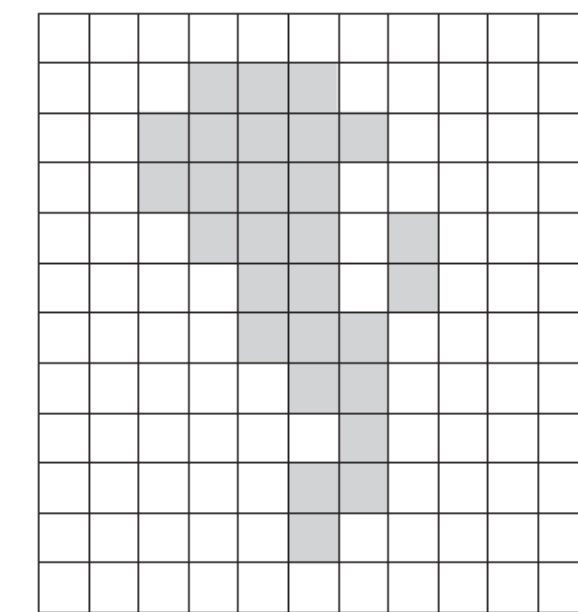
Множество A



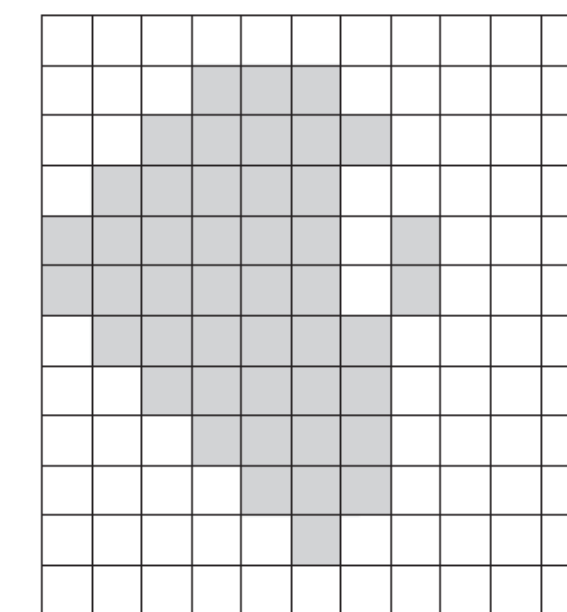
$X_0^1 = A$



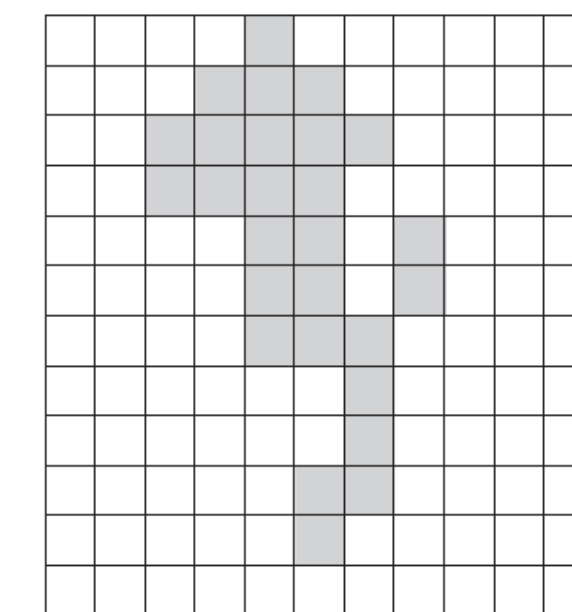
X_4^1



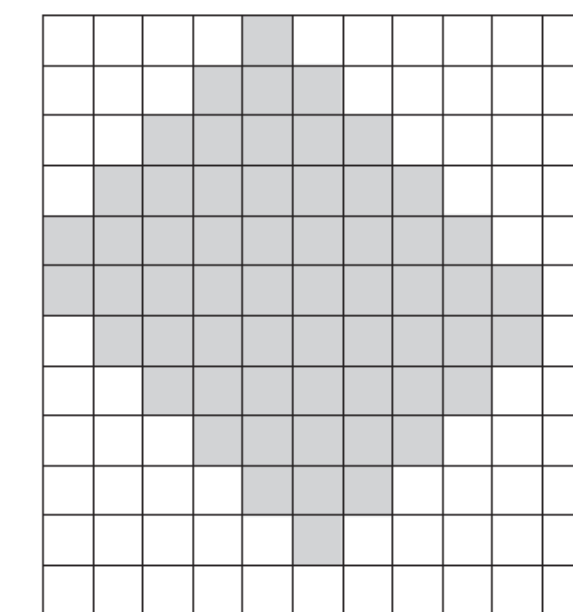
X_2^2



X_8^3



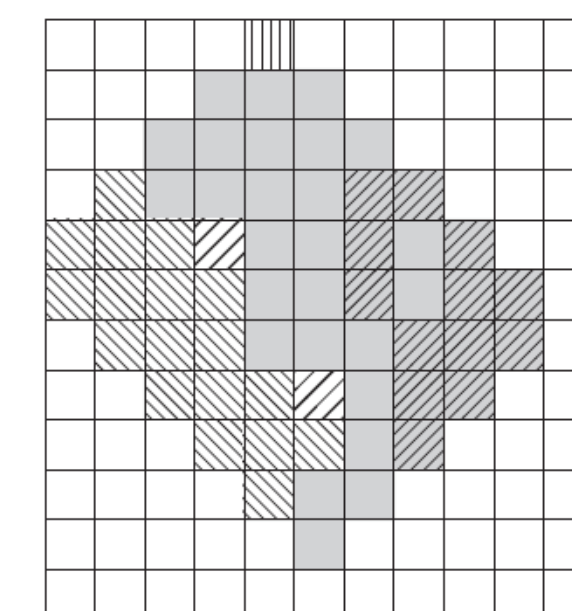
X_2^4



$C(A)$

Выпуклая оболочка

Вклад каждого примитива в формирование выпуклой оболочки



B^1
 B^2
 B^3
 B^4

Основные морфологические алгоритмы

Утончение

- Определяется через преобразование «попадание/пропуск»

$$A \otimes B = A \setminus (A \circledast B) = A \cap (A \circledast B)^c$$

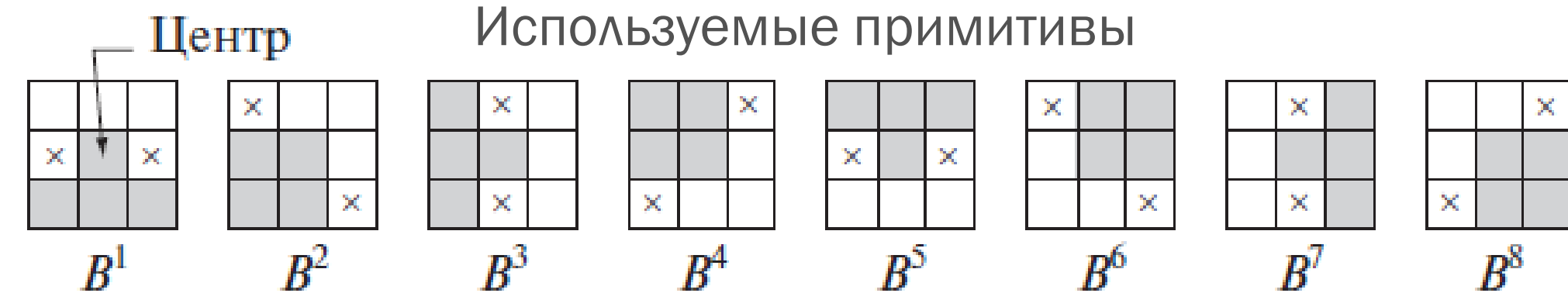
- Поиск в исходном множестве мест совпадения с конфигурацией пикселей примитива без учета фона

- Использование последовательности примитивов

$$\{B\} = \{B^1, B^2, B^3, \dots, B^n\}$$

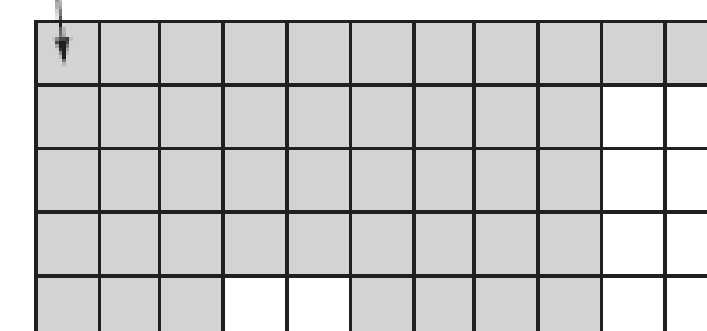
- Определение утончения через последовательность примитивов

$$A \otimes \{B\} = (((((A \otimes B^1) \otimes B^2) \dots) \otimes B^n)$$

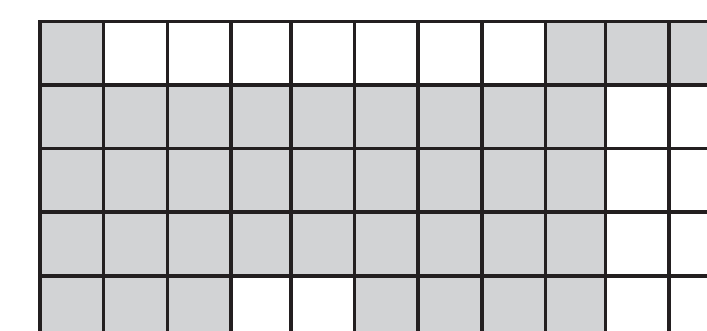


Множество A

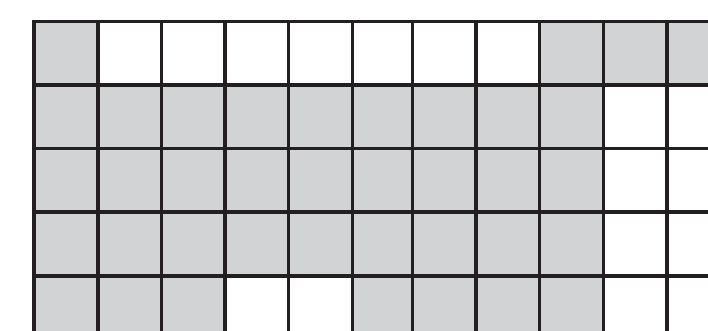
Начало координат



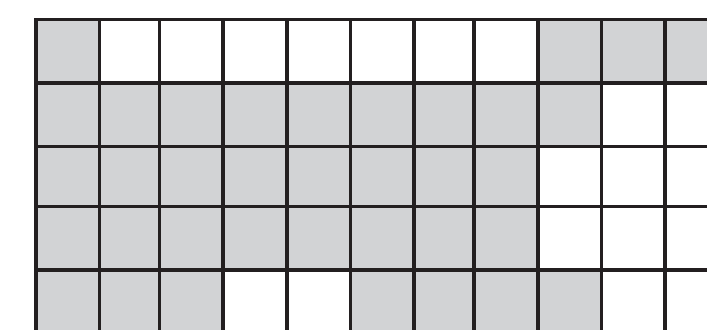
A



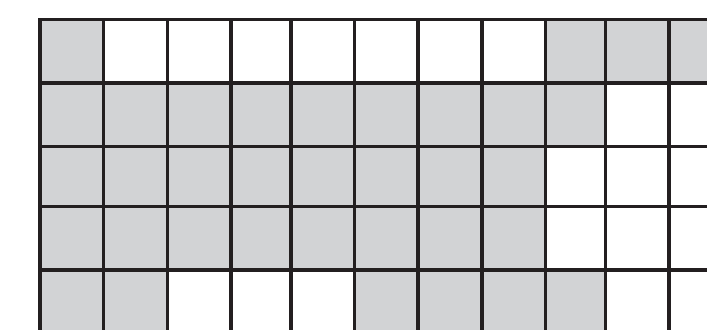
$A_1 = A \otimes B^1$



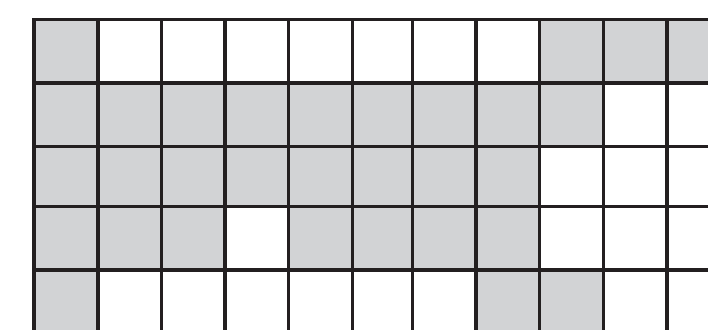
$A_2 = A_1 \otimes B^2$



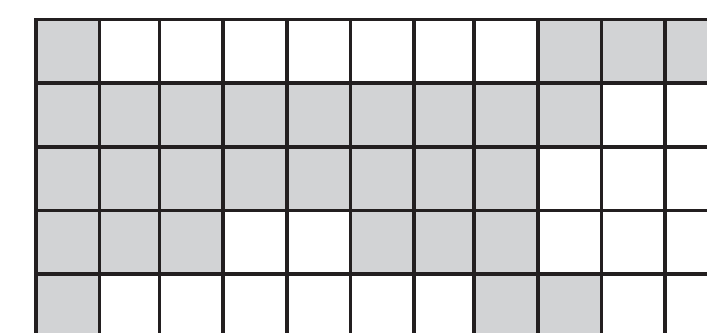
$A_3 = A_2 \otimes B^3$



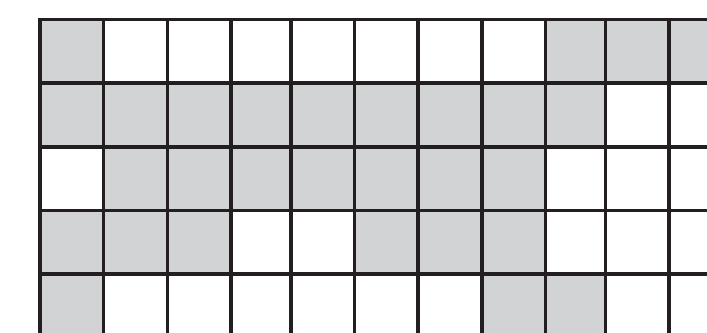
$A_4 = A_3 \otimes B^4$



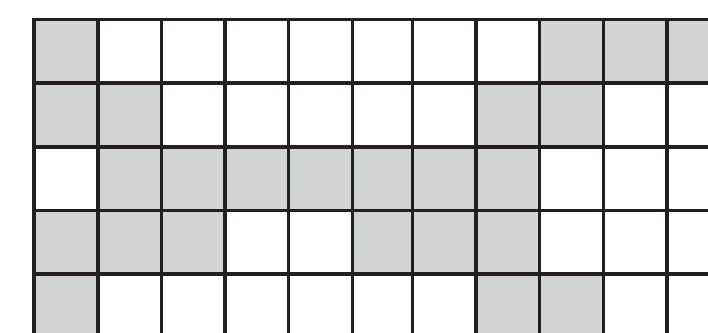
$A_5 = A_4 \otimes B^5$



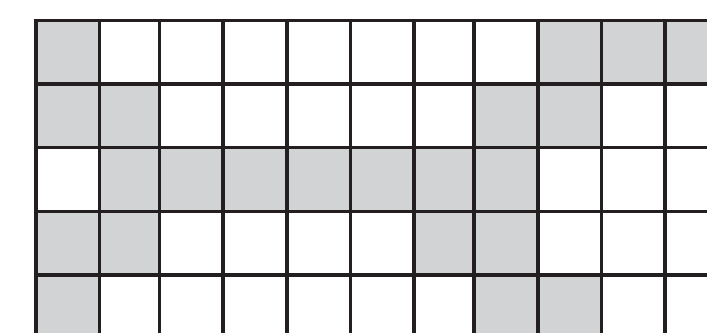
$A_6 = A_5 \otimes B^6$



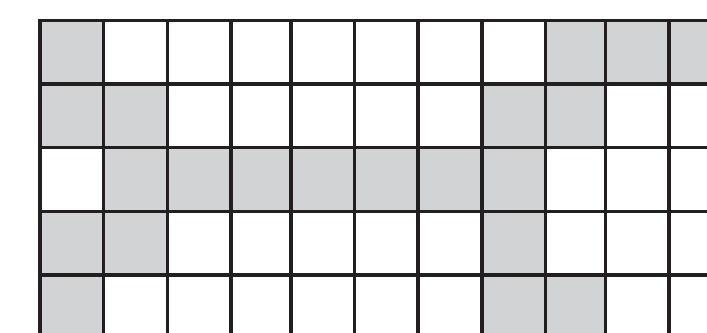
$A_8 = A_6 \otimes B^{7,8}$



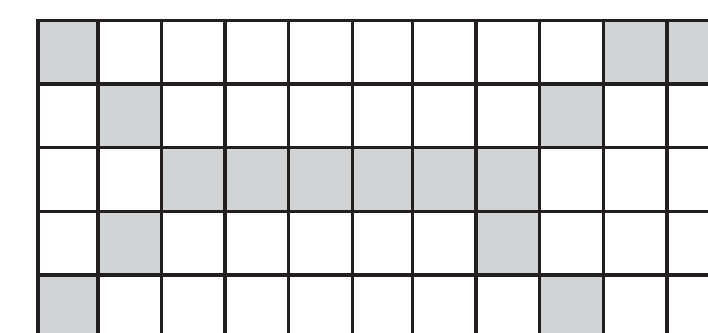
$A_{8,4} = A_8 \otimes B^{1,2,3,4}$



$A_{8,5} = A_{8,4} \otimes B^5$



$A_{8,6} = A_{8,5} \otimes B^6$



$A_{8,6}$ преобразовано для t связности

Дальнейших изменений нет

Основные морфологические алгоритмы

Утолщение

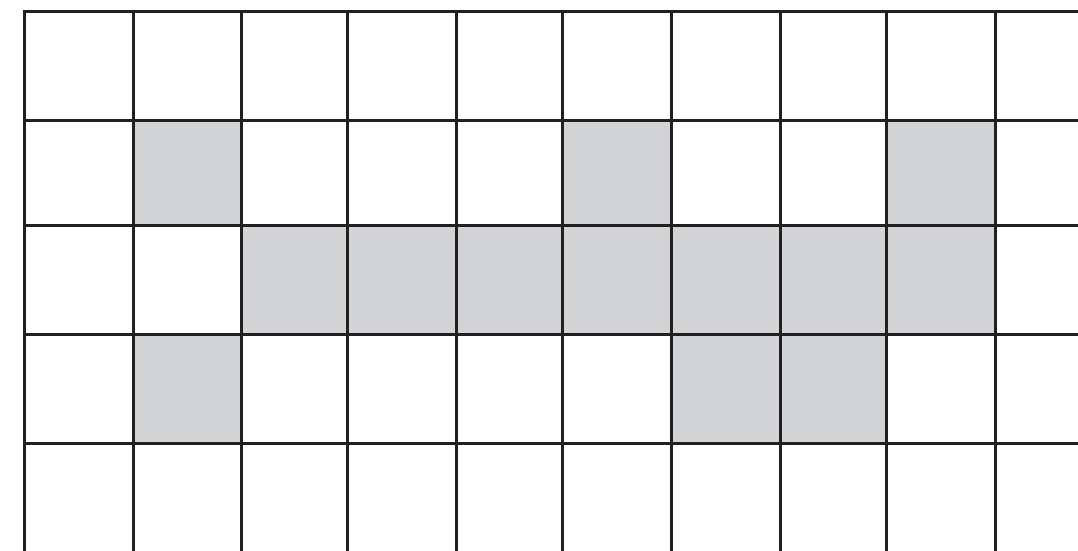
- Использует утончение дополнения

$$A \odot B = A \cup (A * B)$$

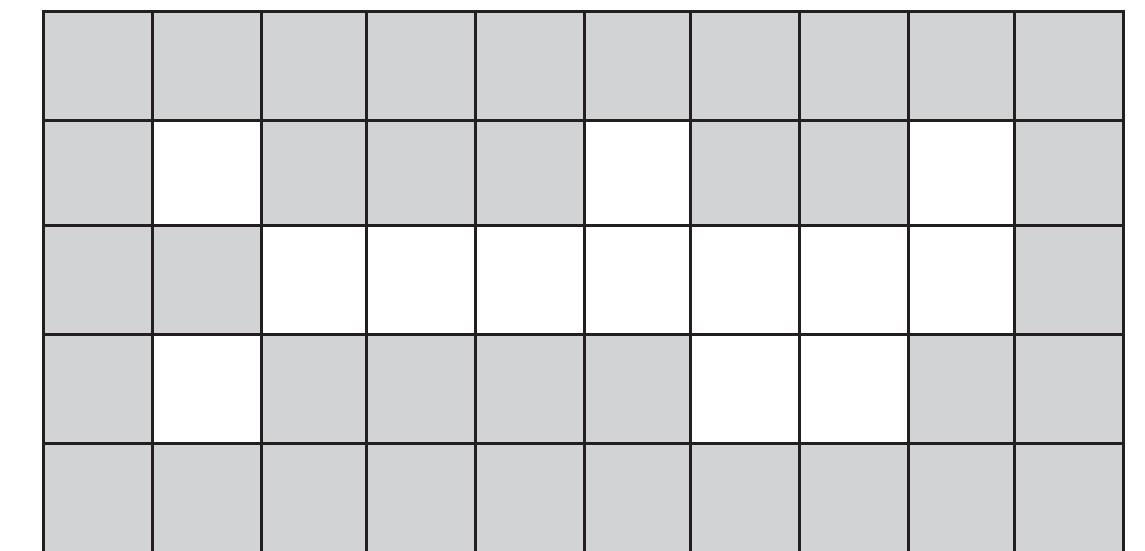
- Определение утолщение через последовательность примитивов

$$A \odot \{B\} = (((...((A \odot B^1) \odot B^2)...) \odot B^n)$$

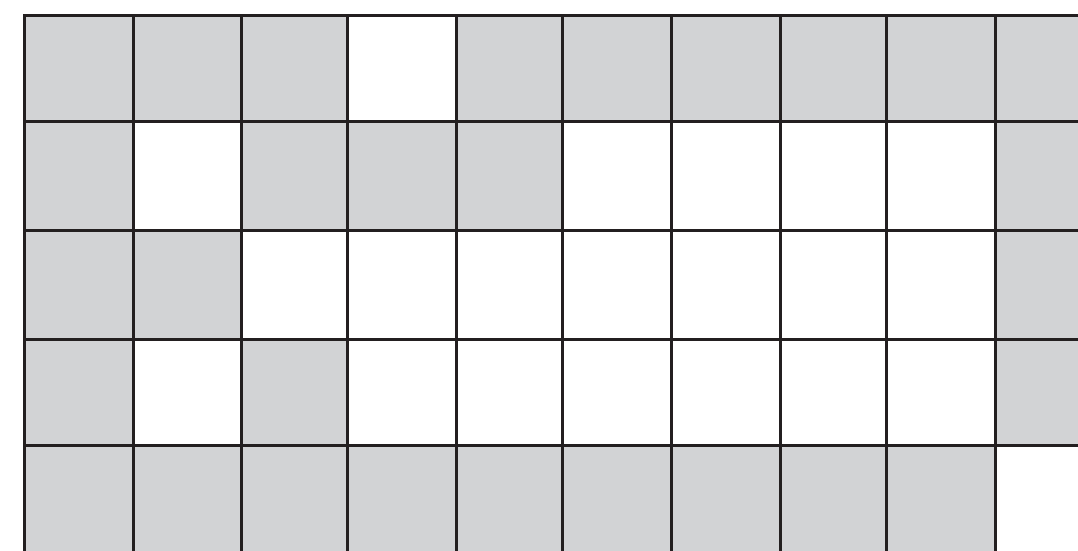
Множество A



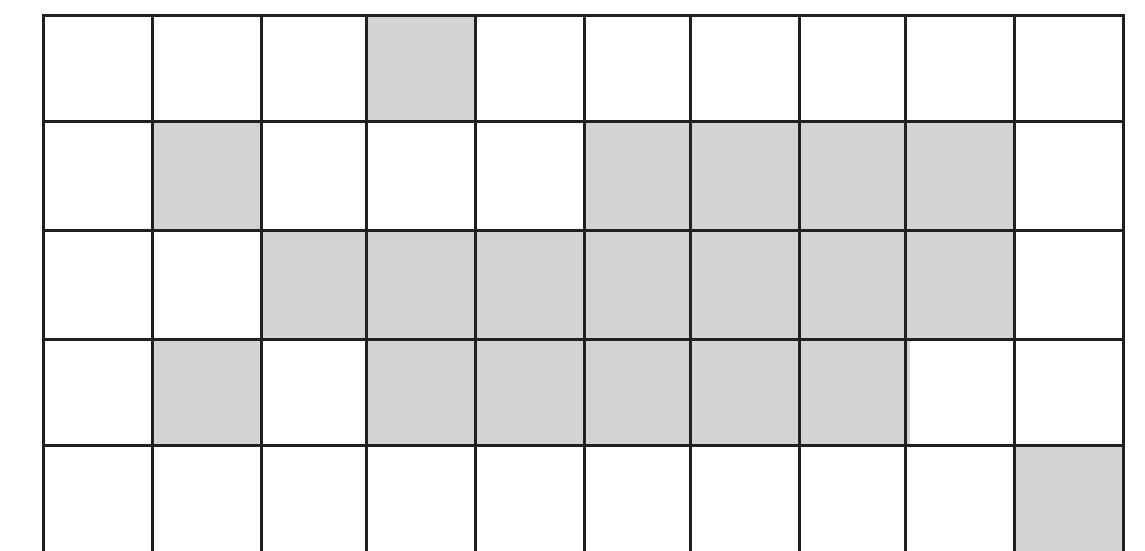
Дополнение множества A



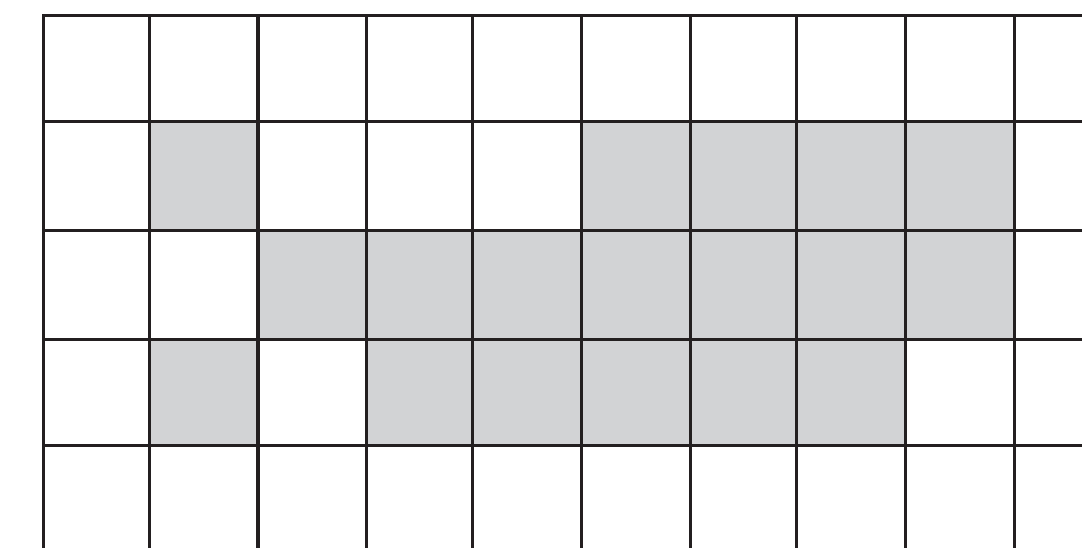
Результат утончения дополнения A



Дополнение к предыдущему



После удаления изолированных точек



Основные морфологические алгоритмы

Построение остова

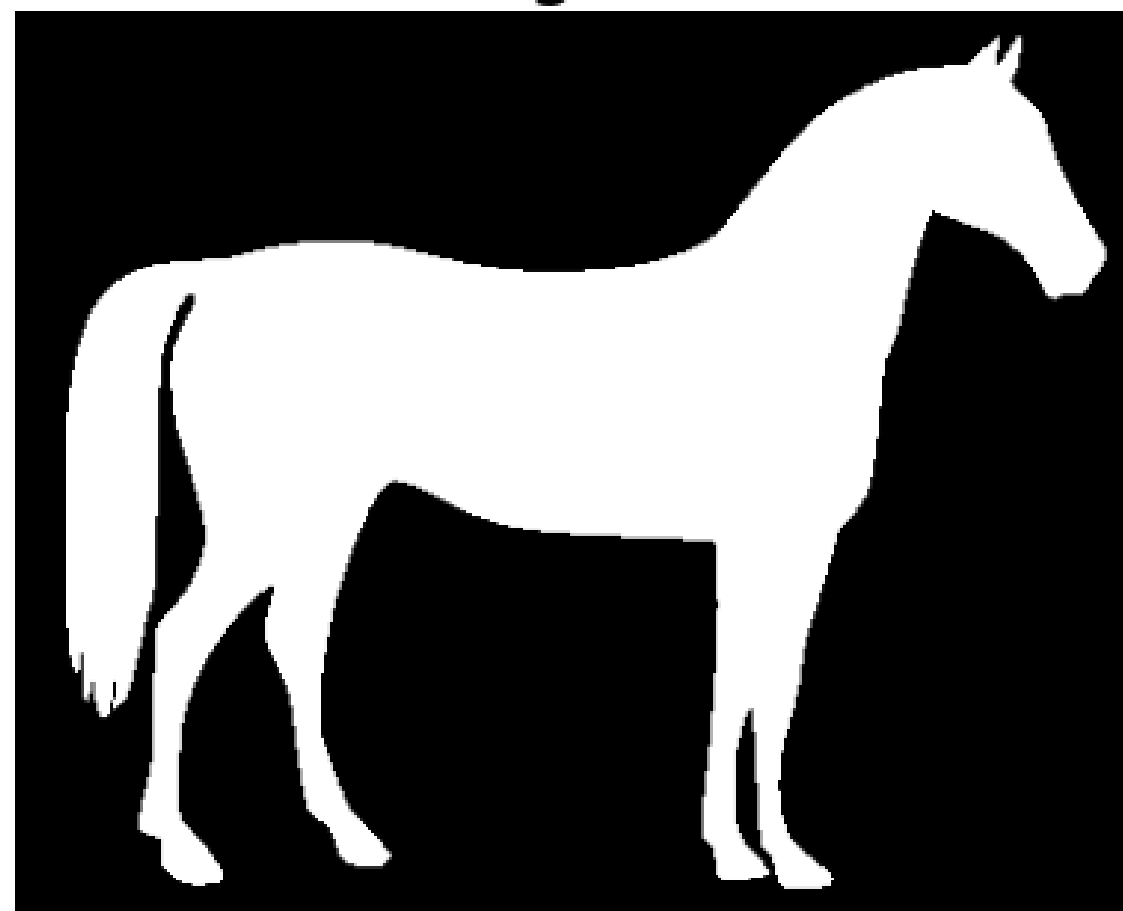
- Множество точек, образующих остов A , может быть выражено с использованием операций эрозии и размыкания

$$S(A) = \bigcup_{k=1}^K S_k(A) \quad S_k(A) = (A \ominus k B) \setminus ((A \ominus k B) \circ B)$$

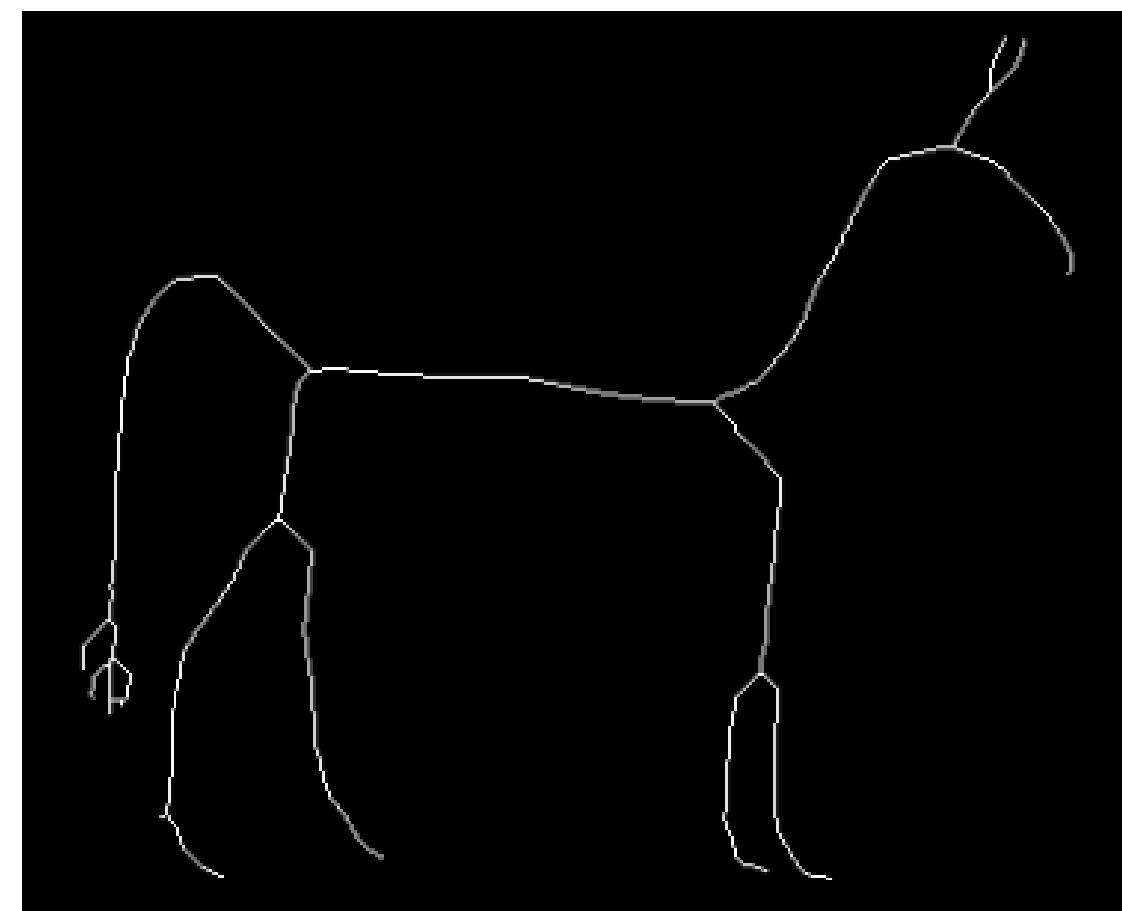
- Реализация через k последовательных применений операции эрозии к множеству A

$$(A \ominus k B) = ((\dots (A \ominus B) \ominus B) \ominus \dots) \ominus B$$

original



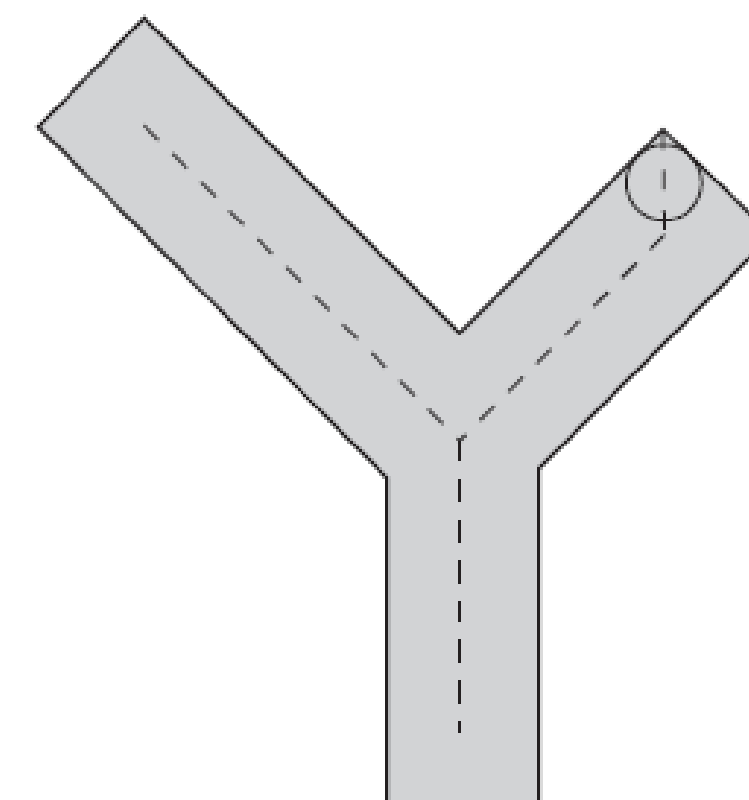
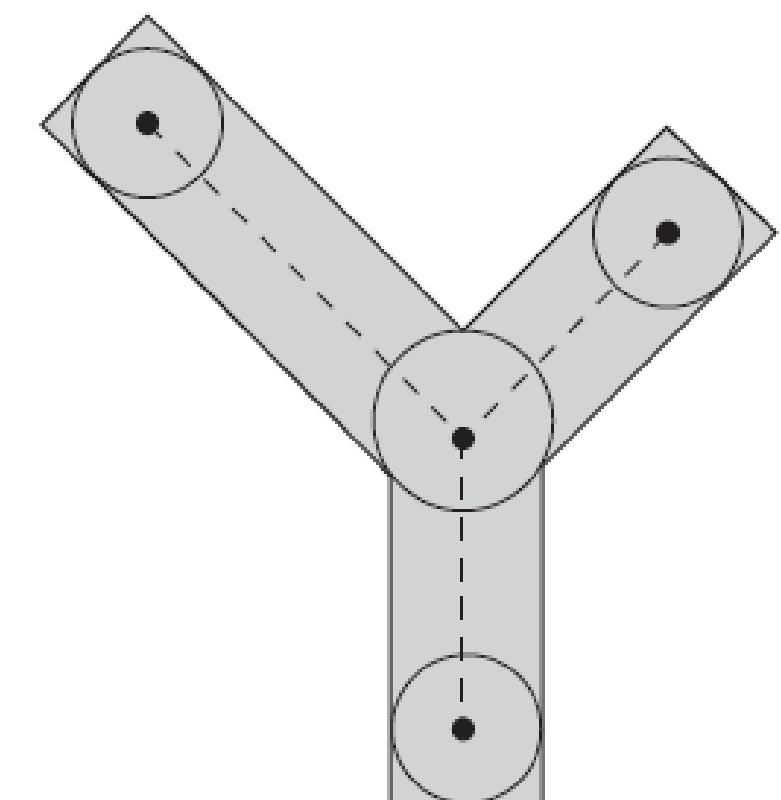
skeleton



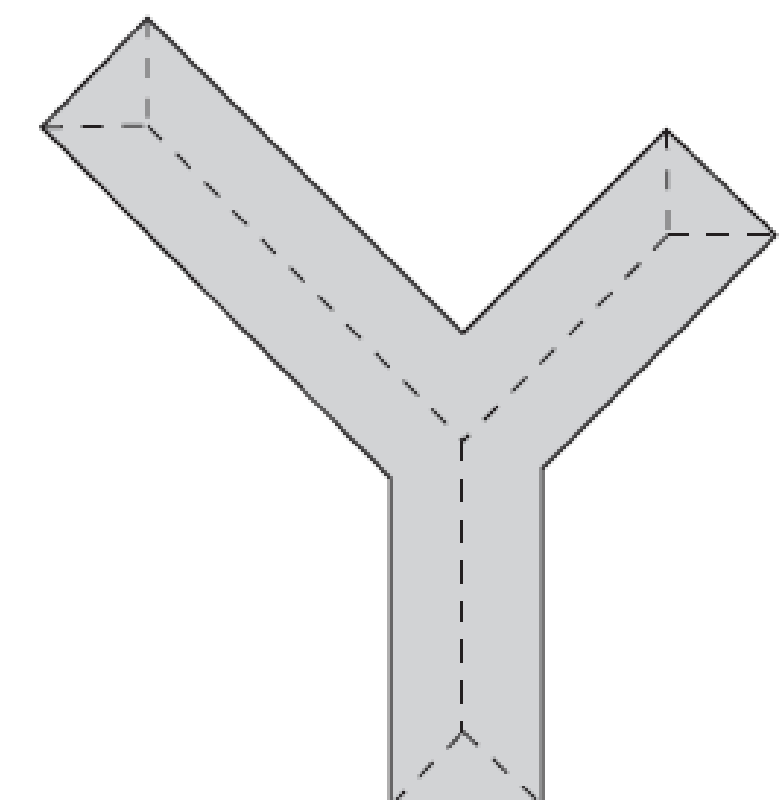
Множество A



Различные положения максимальных кругов с центрами на остова A.



Добавочные максимальные круги на других отрезках остова



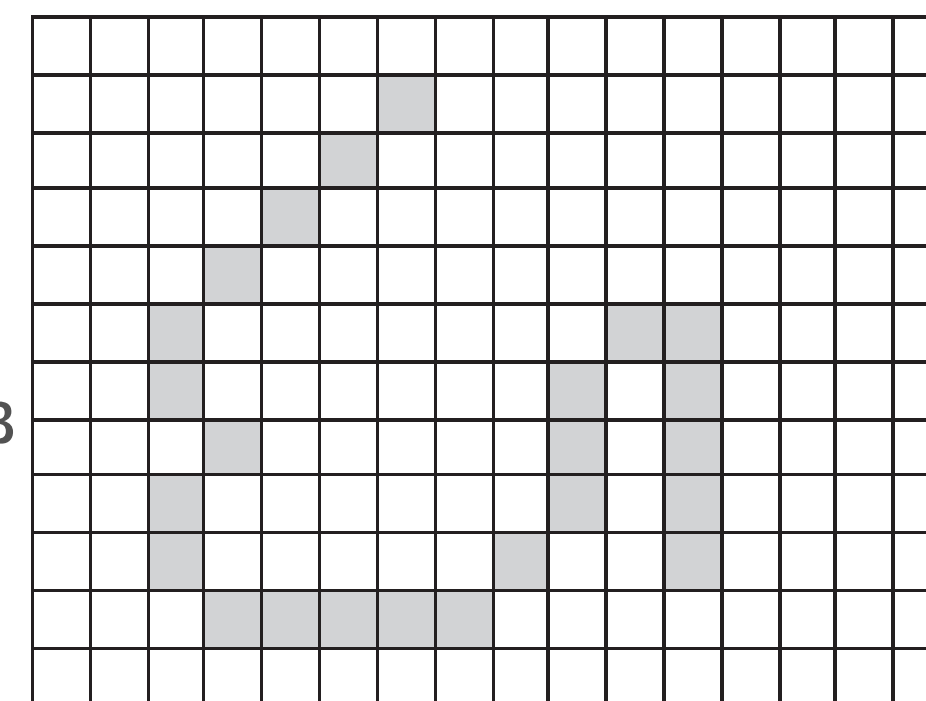
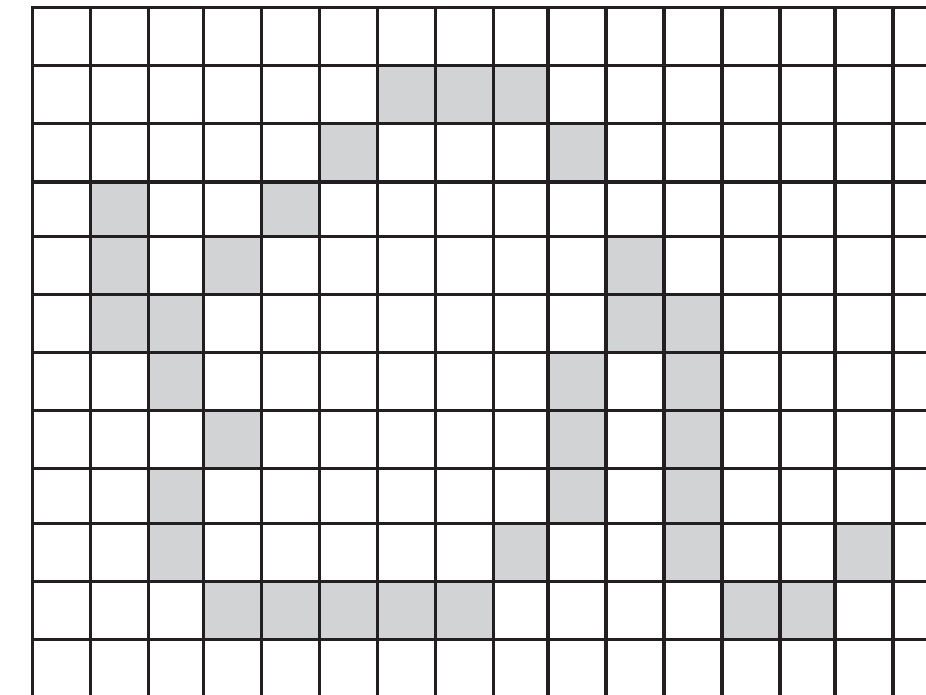
Полный остов

Основные морфологические алгоритмы

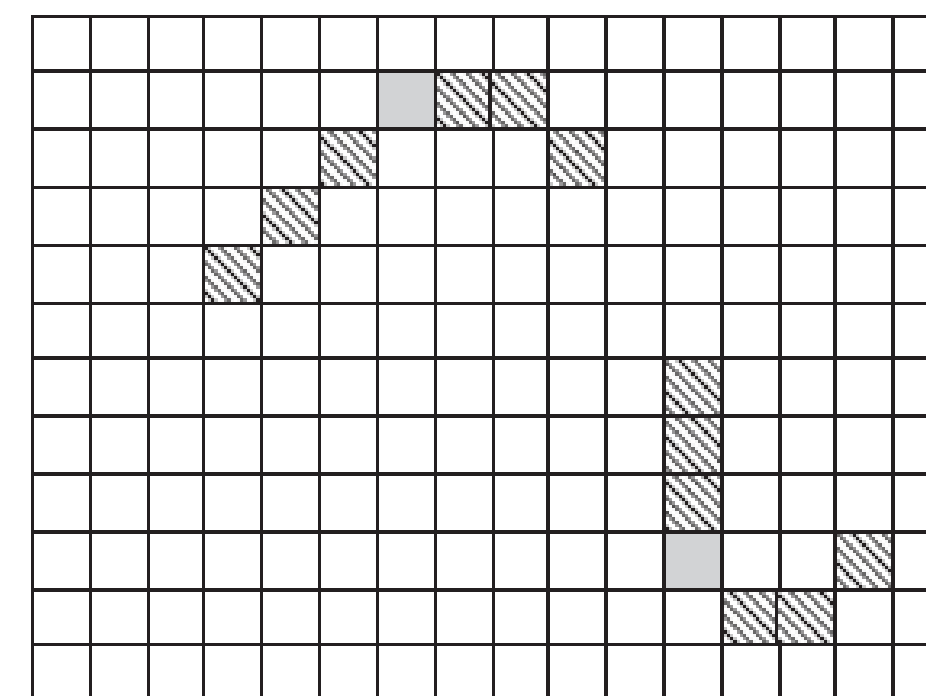
Усечение

- Дополнение к алгоритмам утончения и построения остова
- Область применения: автоматическое распознавание рукописных знаков на основе анализа формы остова каждого символа
- Задача – удаление паразитных отростков остова

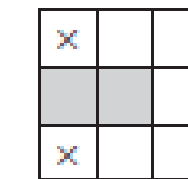
Исходное изображение



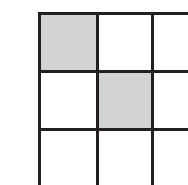
Дилатация концевых точек
при условии
принадлежности множеству



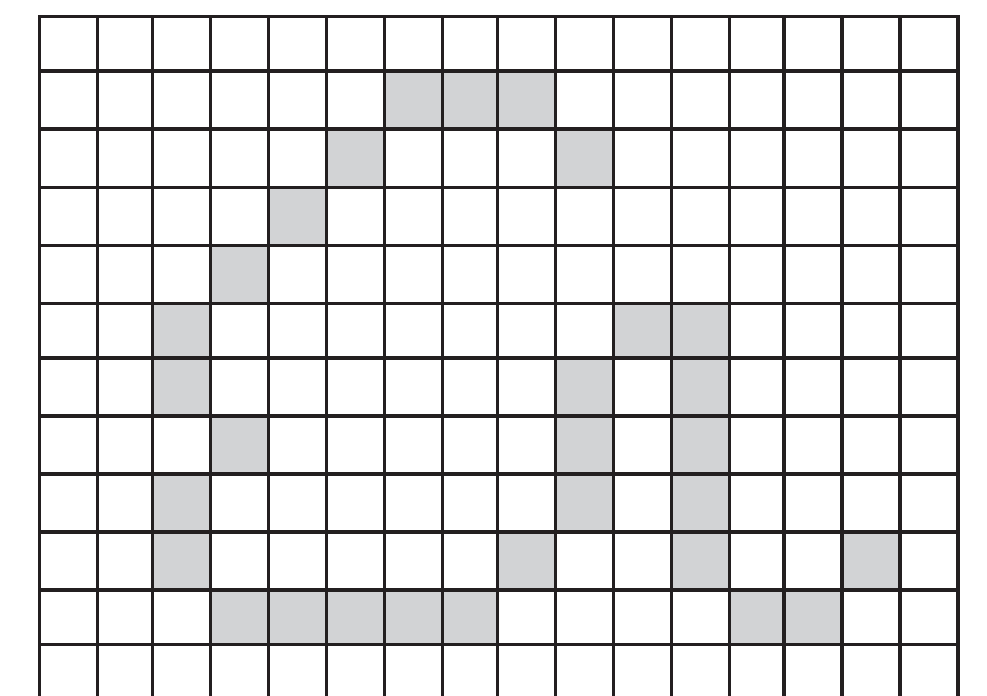
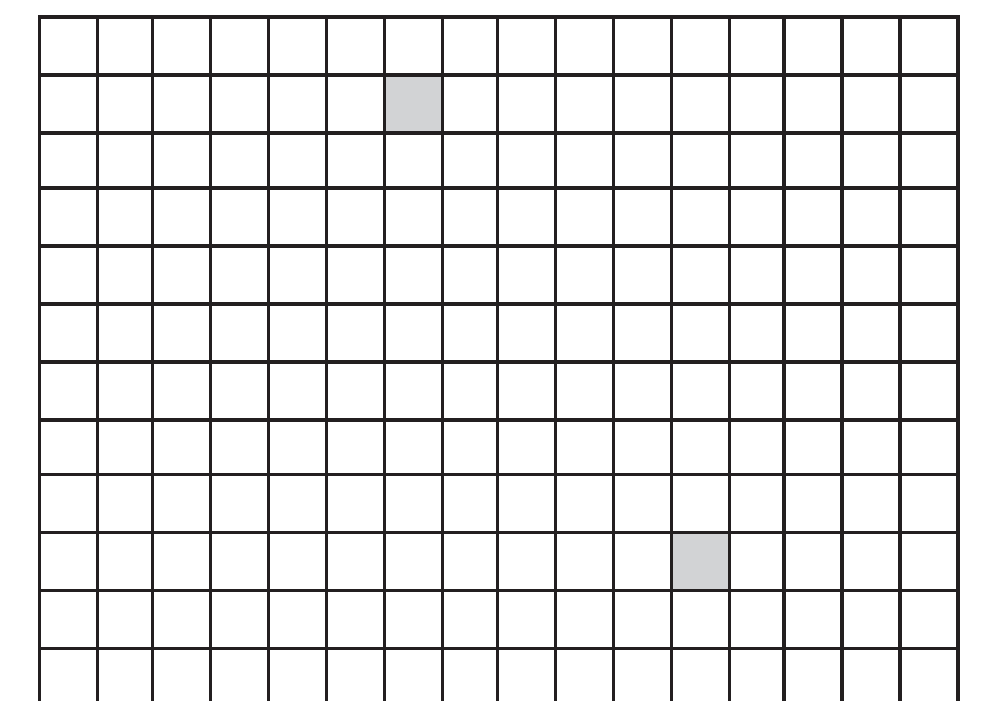
Примитивы для удаления
концевых точек



B^1, B^2, B^3, B^4 (с поворотами на 90°)



B^5, B^6, B^7, B^8 (с поворотами на 90°)



После усечения

Основные морфологические алгоритмы

Виды морфологических операций

| | | | | | |
|-----------------------|---|---|-------------------|--|--|
| Параллельный перенос | $(B)_z = \{w \mid w = b + z, b \in B\}$ | Сдвиг центра (начала координат) множества B в точку z | Выпуклая оболочка | $X_k^i = (X_{k-1}^i \oplus B^i) \cup A; \quad i = 1, 2, 3, 4;$ $k = 1, 2, 3, \dots; \quad X_0^i = A \quad \text{и} \quad D^i = X_{\text{сход}}^i$ | Находит для множества A выпуклую оболочку $C(A)$. Индекс «сход» соответствует сходимости в том смысле, что $X_k^i = X_{k-1}^i$ (III) |
| Центральное отражение | $\hat{B} = \{w \mid w = -b, b \in B\}$ | Симметричное отражение всех элементов B относительно начала координат | Утончение | $A \otimes B = A \setminus (A \oplus B)$ $A \otimes B = A \cap (A \oplus B)^c$ $A \otimes \{B\} = ((\dots((A \otimes B^1) \otimes B^2) \dots) \otimes B^n)$ $\{B\} = \{B^1, B^2, B^3, \dots, B^n\}$ | Делает множество A «тоньше». Первые два выражения являются базовым определением утончения. Последние выражения отвечают утончению по последовательности примитивов. Этот метод обычно применяется на практике (IV) |
| Дополнение | $A^c = \{w \mid w \notin A\}$ | Множество точек, не входящих в A | Утолщение | $A \odot B = A \cup (A \oplus B)$ $A \odot \{B\} = ((\dots((A \odot B^1) \odot B^2) \dots) \odot B^n)$ | Делает множество A «толще» (см. выше замечание о последовательности примитивов). Используются примитивы (IV), в которых нули заменяются единицами, а единицы — нулями |
| Разность | $A \setminus B = \{w \mid w \in A, w \notin B\} = A \cap B^c$ | Множество точек, принадлежащих A , но не принадлежащих B | Построение остова | $S(A) = \bigcup_{k=0}^K S_k(A)$ $S_k(A) = (A \ominus kB) \setminus [(A \ominus kB) \circ B]$ Восстановление множества A : $A = \bigcup_{k=0}^K (S_k(A) \oplus kB)$ | Находит остов $S(A)$ множества A . Последнее выражение показывает, что множество A может быть восстановлено по подмножествам остова $S_k(A)$. В этих выражениях значение K — номер шага итерации, после которого эрозия множества A приводит к пустому множеству. Запись $(A \ominus kB)$ обозначает k применений подряд к множеству A операции эрозии по примитиву B (I) |
| Дилатация | $A \oplus B = \{z \mid (\hat{B})_z \cap A \neq \emptyset\}$ | «Расширение» границы множества A (I) | | | |
| Эрозия | $A \ominus B = \{z \mid (B)_z \subseteq A\}$ | «Сужение» границы множества A (I) | | | |
| Размыкание | $A \circ B = (A \ominus B) \oplus B$ | Сглаживает контуры, разрывает узкие перешейки, убирает небольшие островки и острые выступы (I) | | | |
| Замыкание | $A \bullet B = (A \oplus B) \ominus B$ | Сглаживает контуры, заполняет узкие разрывы, углубления и небольшие дырки (I) | | | |
| Попадание/пропуск | $A \circledast B = (A \ominus B_1) \cap (A^c \ominus B_2) = (A \ominus B_1) \setminus (A \oplus \hat{B}_2)$ | Множество координат точек, в которых одновременно для B_1 есть совпадение в A , а для B_2 — в A^c | | | |

Морфология полутоновых изображений

Основы

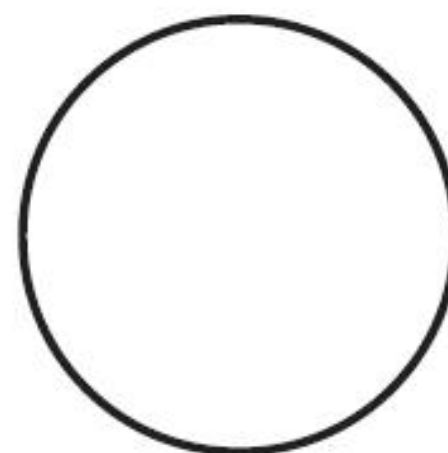
- Применение операций к цифровым изображениям $f(x,y)$ с помощью зондирующего воздействия – примитива $b(x,y)$

Категории примитивов:

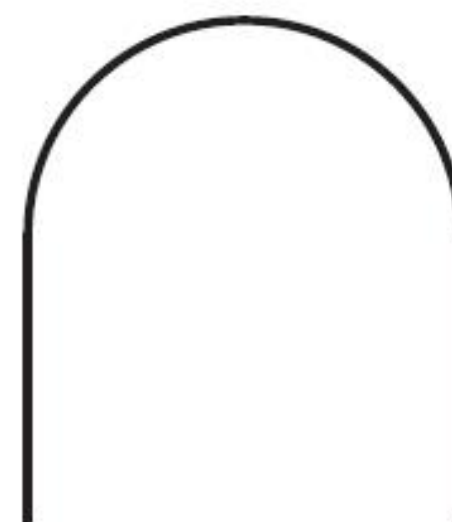
- Плоские (однотонные)
- Неплоские (неоднотонные)



Неплоский
примитив



Плоский
примитив



Профиль
яркости



Профиль
яркости

Применение морфологических градиентных методов к полутоновому изображению

(a)



(b)



(c)



(d)



Морфология полутоновых изображений

Эрозия и дилатация

Полутоновая эрозия:

- изображения f по плоскому примитиву b в произвольной точке (x, y) определяется как минимальное значение f в области, совпадающей с b , когда центр примитива находится в точке (x, y)

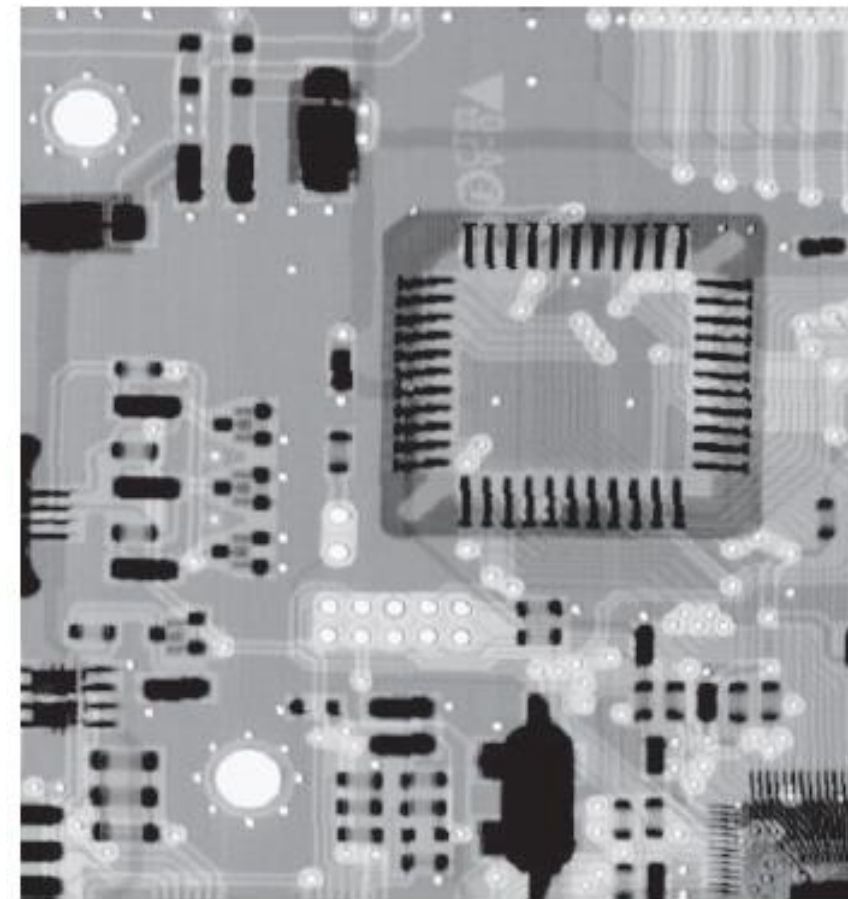
$$(f \ominus b)(x, y) = \min_{(s, t) \in b} \{f(x + s, y + t)\}$$

Полутоновая дилатация:

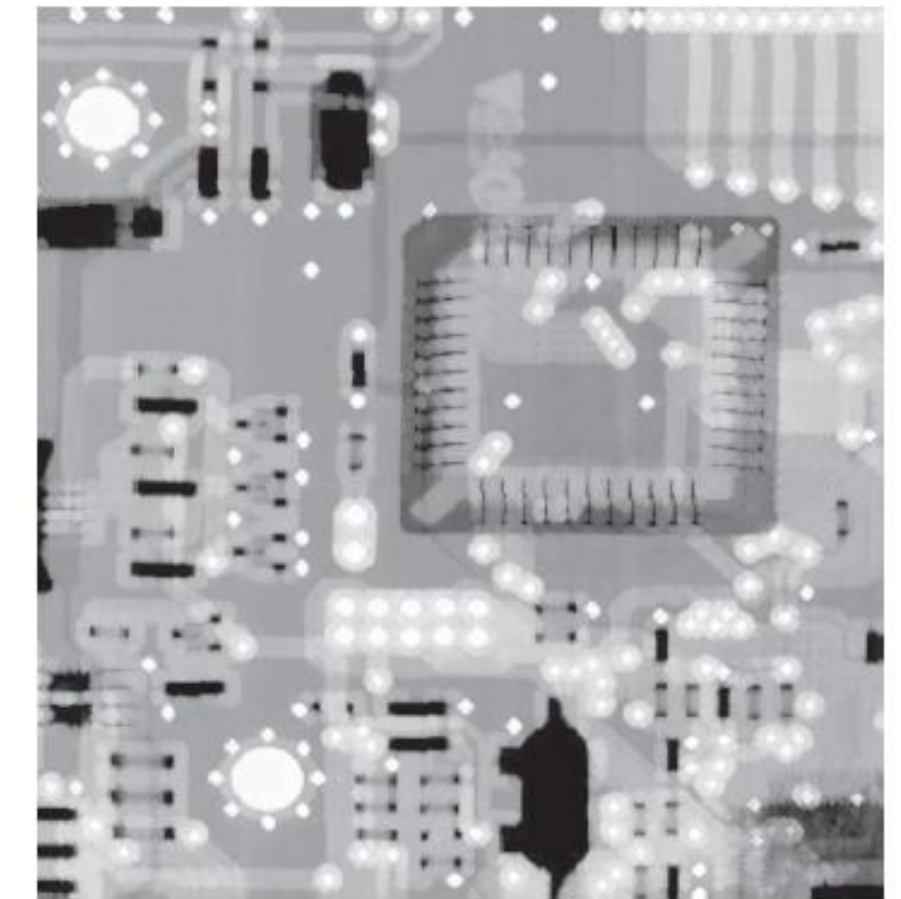
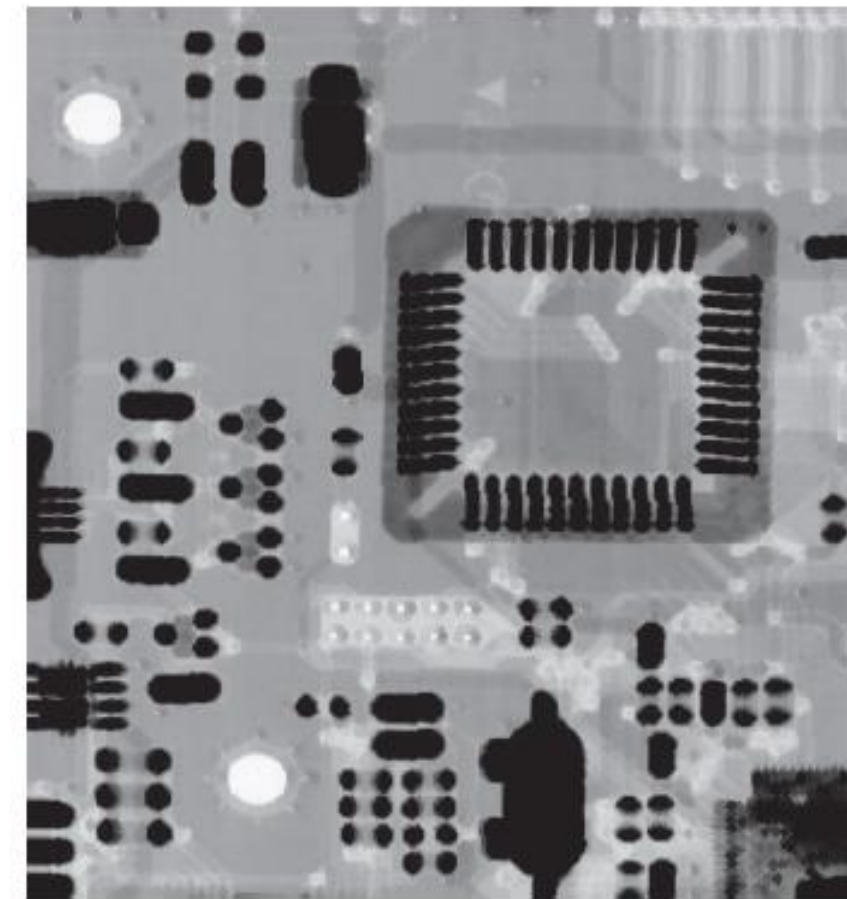
- изображения f по плоскому примитиву b в произвольной точке (x, y) определяется как максимальное значение f в окрестности, совпадающей с b , когда центр примитива находится в точке (x, y)

$$(f \oplus b)(x, y) = \max_{(s, t) \in b} \{f(x - s, y - t)\}$$

Исходное полутоновое
рентгеновское изображение



Результат дилатации по тому
же примитиву



Результат эрозии по плоскому
примитиву в форме круга
радиусом 2 пикселя

Морфология полутоновых изображений

Размыкание и замыкание

Полутоновое размыкание:

- изображения f по примитиву b аналогична бинарному случаю и состоит в эрозии f по b , после чего к результату применяется дилатация по b : $f \circ b = (f \ominus b) \oplus b$

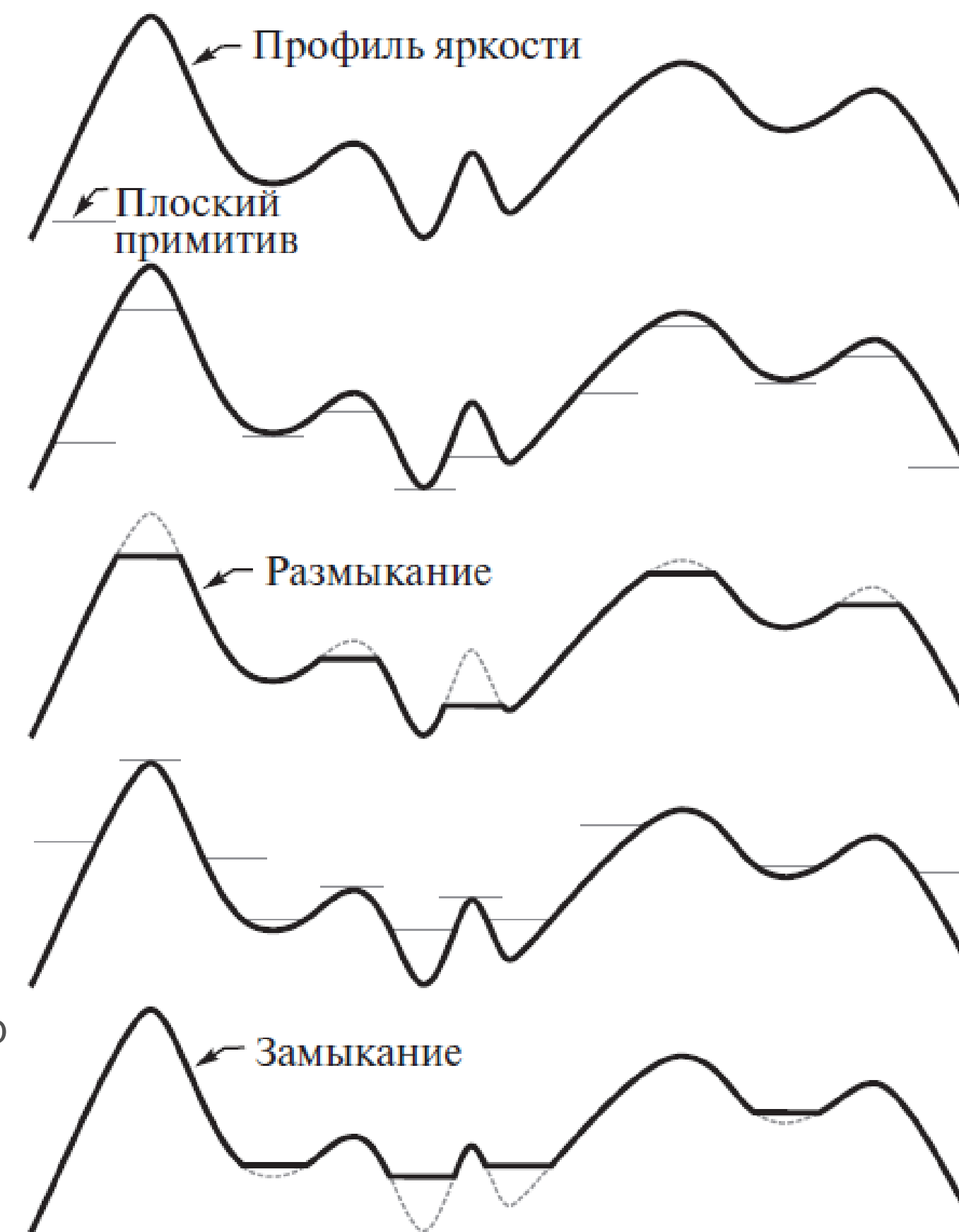
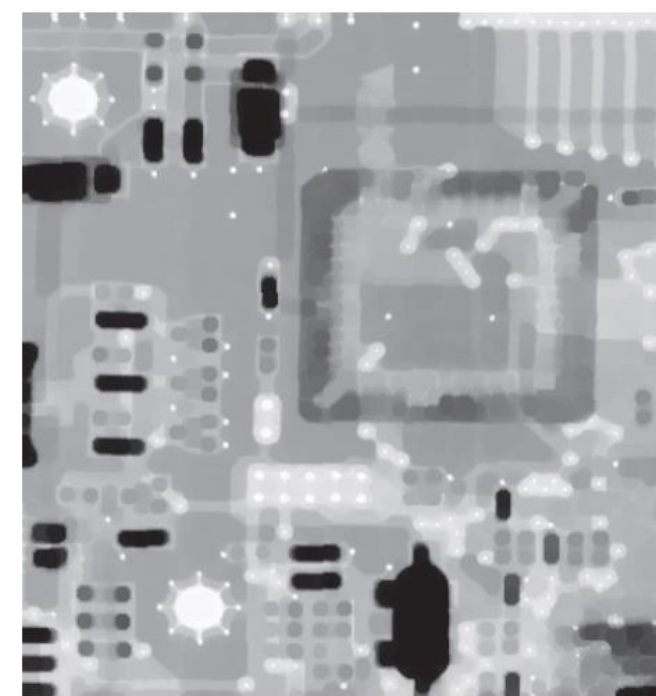
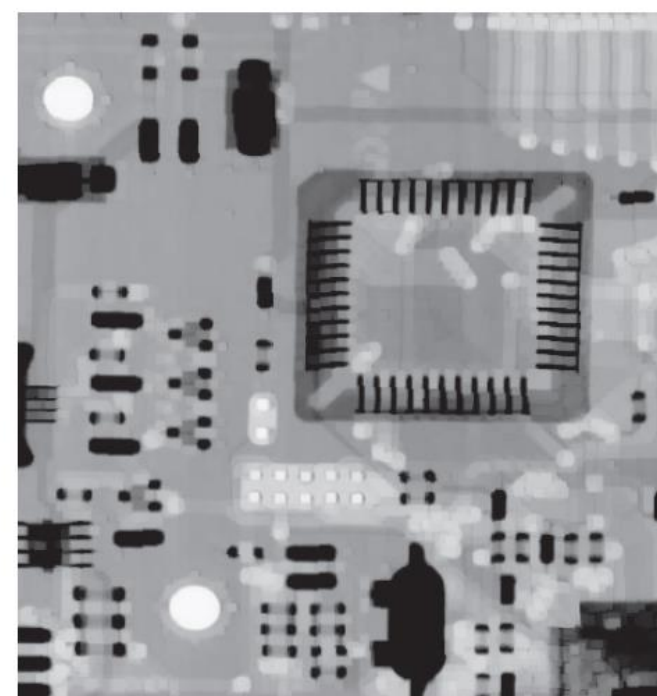
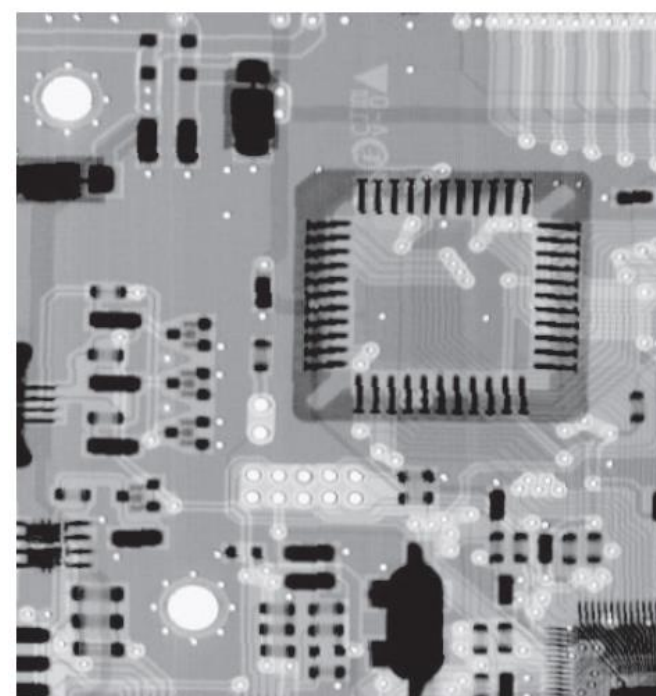
Полутоновая замыкание:

- Аналогично бинарному случаю:

$$f \bullet b = (f \oplus b) \ominus b$$

Размыкание по плоскому примитиву в форме круга радиусом 3 пикселя

Результат замыкания по круглому примитиву радиусом 5 пикселей



Исходный одномерный сигнал

Положения плоского примитива при обходе кривой снизу

Результат размыкания

Положения плоского примитива при обходе кривой сверху

Результат замыкания

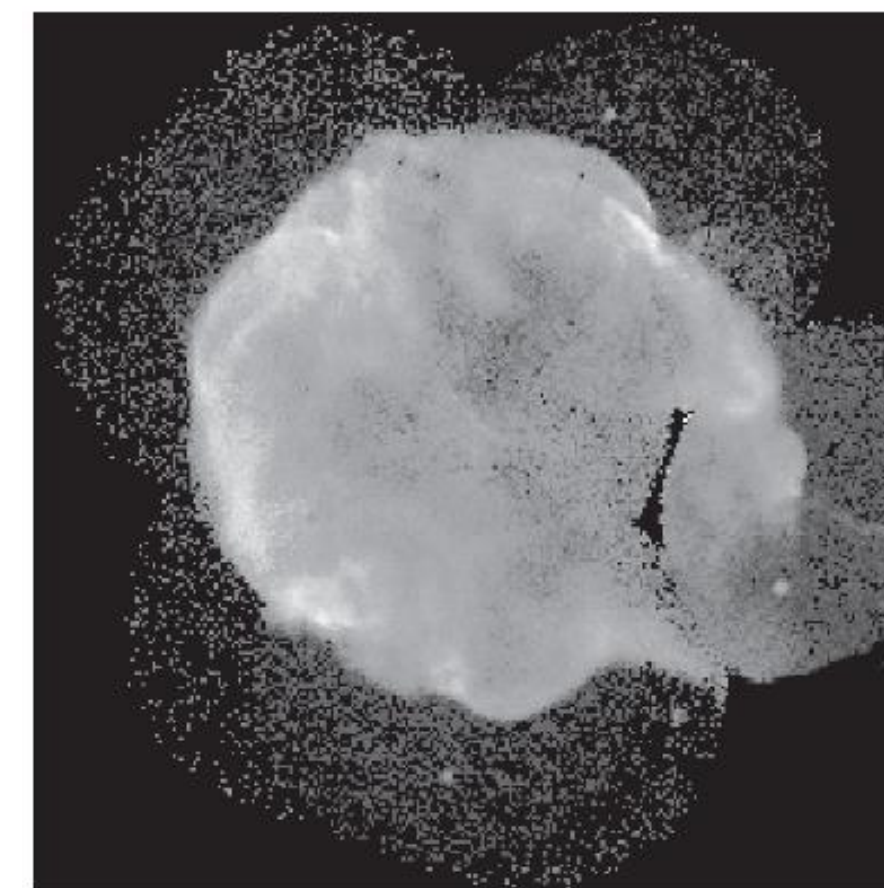
Морфология полутоновых изображений

Морфологическое сглаживание

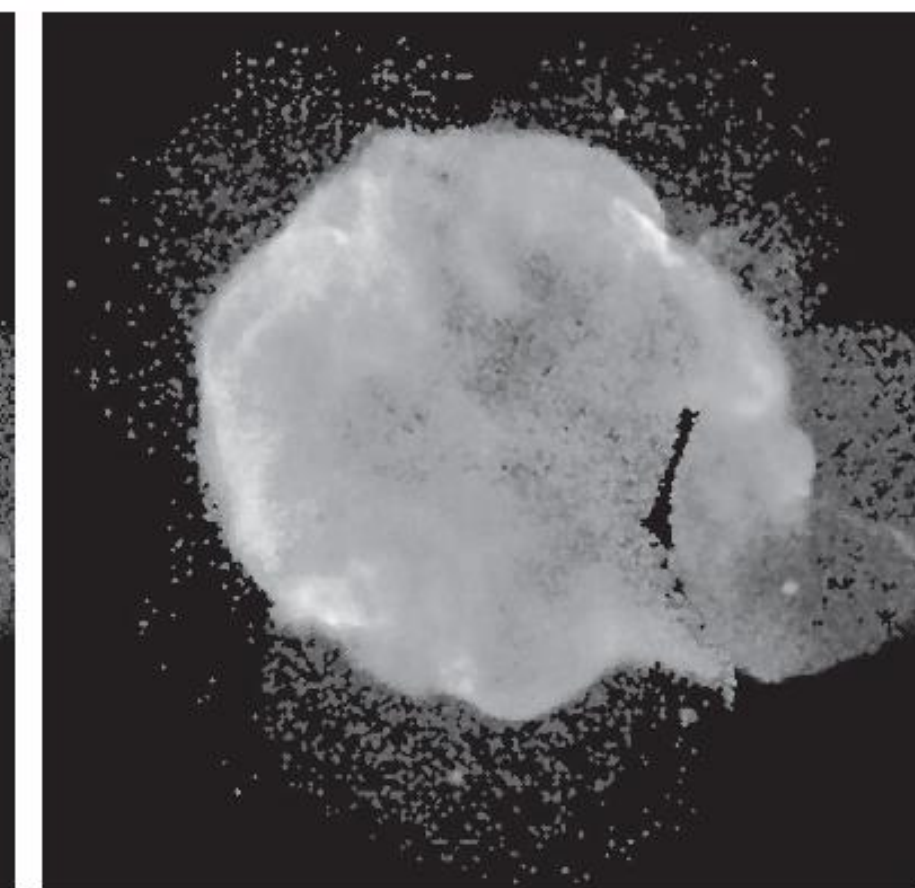
Морфологические фильтры:

- операция размыкания удаляет яркие детали, размеры которых меньше заданного примитива
- операция замыкания удаляет темные детали
- попеременная последовательная фильтрация

Рентгеновское
изображение сверхновой
в Петле Лебеда



Пары операций
морфологического
размыкания $R = 1$



Пары операций
морфологического
размыкания $R = 3$



Пары операций
морфологического
размыкания $R = 5$

Морфология полутоновых изображений

Морфологический градиент

- Комбинация дилатации и эрозии с вычитанием изображений

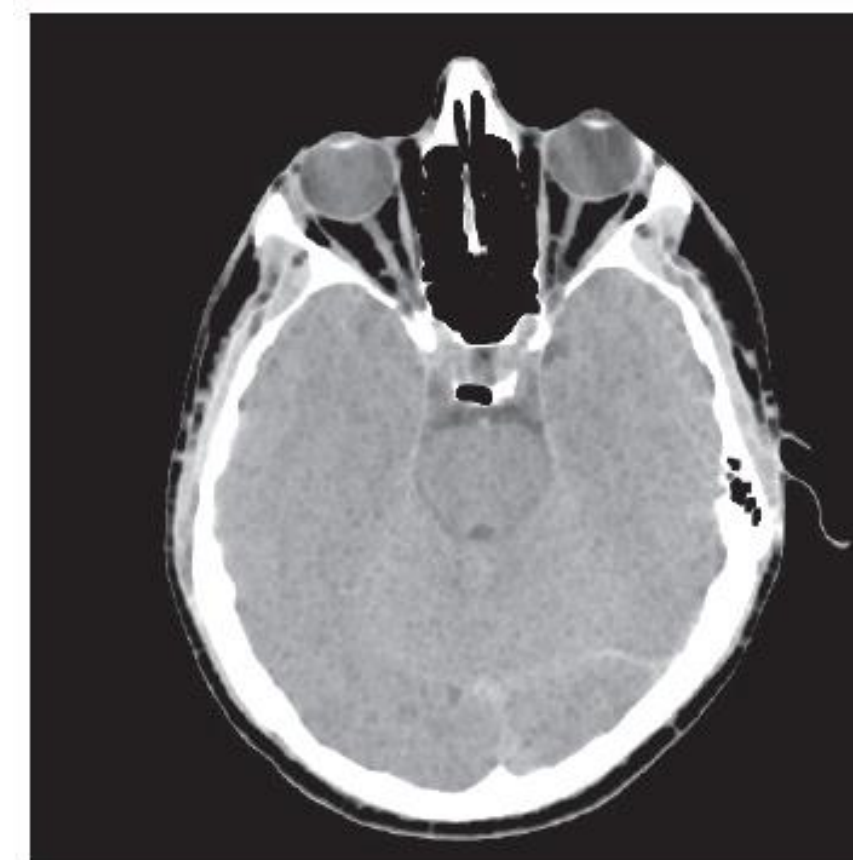
$$g = (f \oplus b) - (f \ominus b)$$

- Дилатация расширяет области на изображении
- Эрозия сжимает их
- Разность полученных изображений подчеркивает перепады между областями

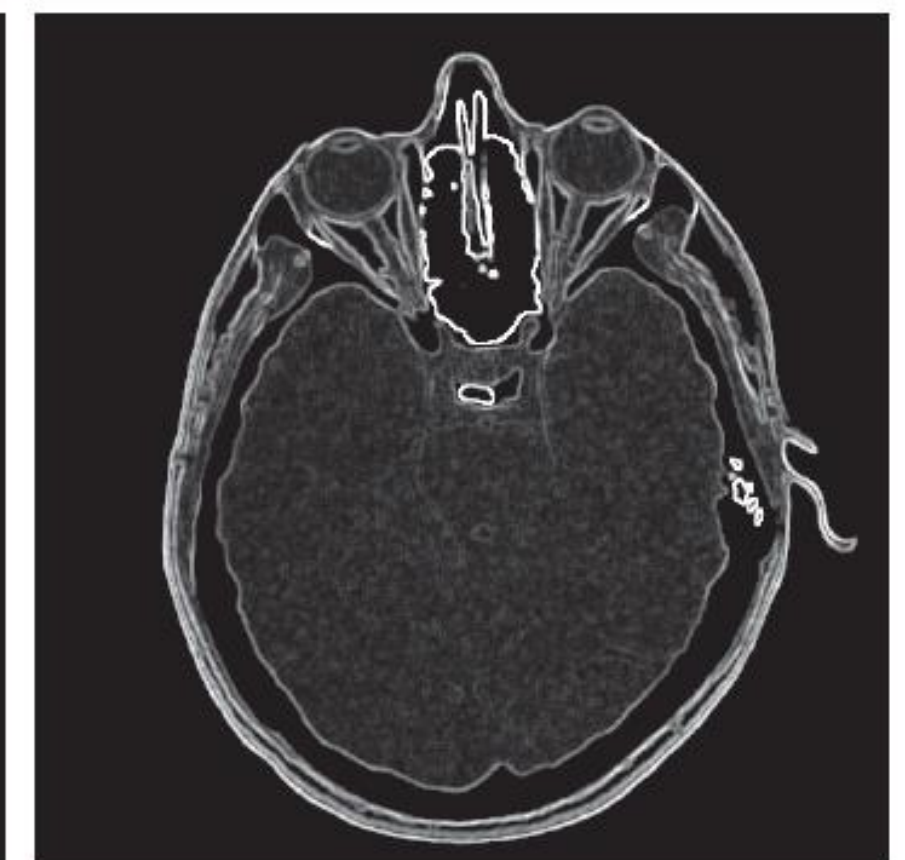
Одиночный скан головы
при компьютерной
томографии



Результат дилатации



Результат эрозии



Морфологический
градиент исходного
изображения

Морфология полутоновых изображений

Преобразование выступ и впадина

- Результат совместного применения операций вычитания изображений и морфологического размыкания/замыкания
- Выступ – разность исходного изображения и результата его размыкания:

$$T_{hat} = f - (f \circ b)$$

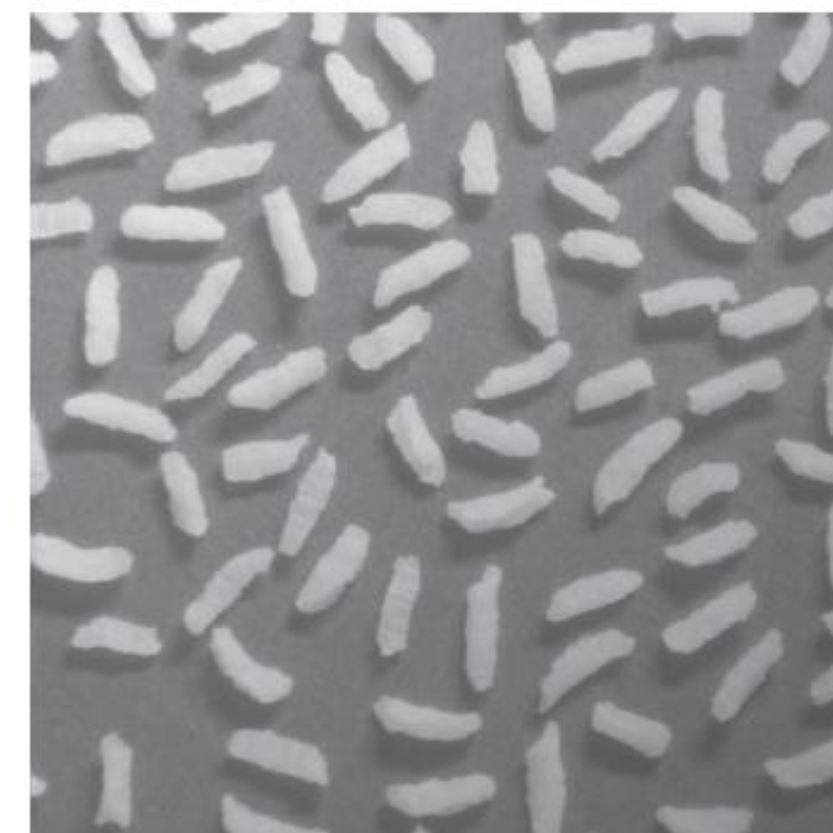
- Впадина – разность результата размыкания и исходного изображения:

$$B_{hat} = (f \bullet b) - f$$

Применения:

- Удалить объекты
- Коррекция неравномерности освещения

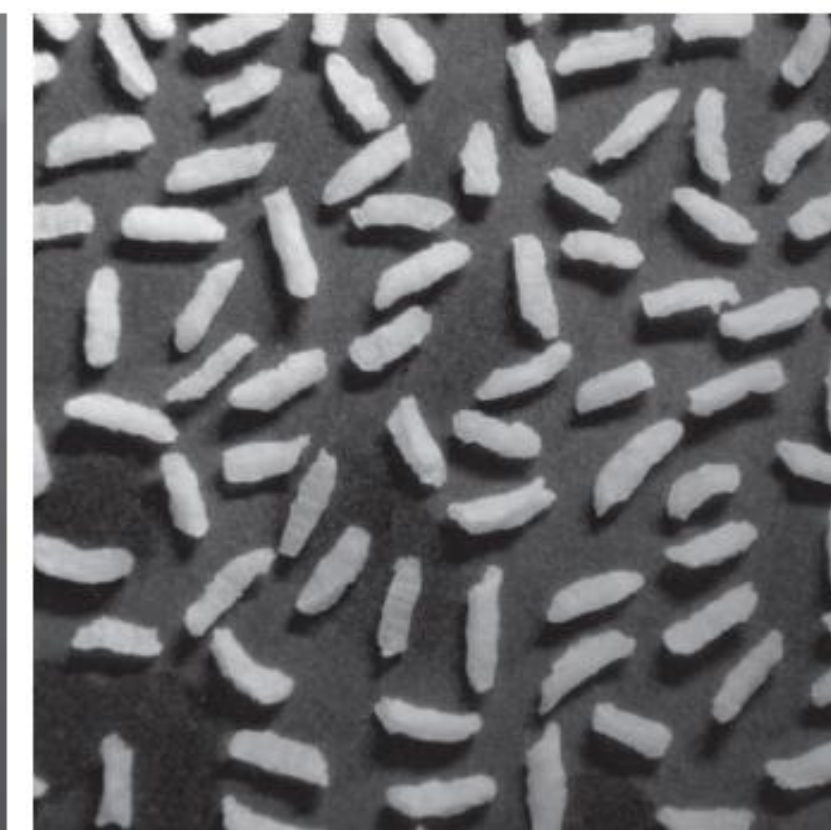
Исходное изображение



Изображение после пороговой обработки



Размыкание по круглому примитиву радиусом 40 пикселей



Исходное изображение минус результат его размыкания



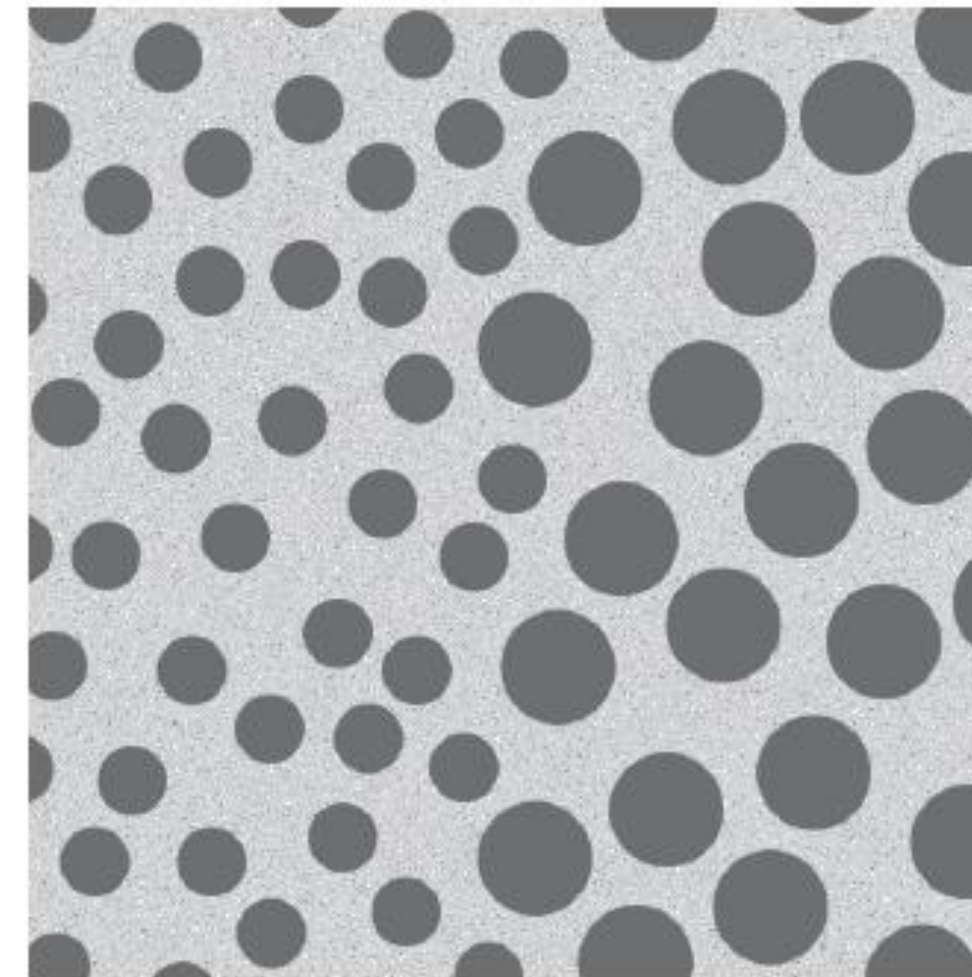
Результат пороговой обработки

Морфология полутоновых изображений

Текстурная сегментация

- Задача – нахождение границы между двумя областями на основе их текстурных признаков
- Замыкание по примитиву с размерами, большими чем объекты меньшего размера, удаляет указанные объекты
- Операция размыкания по примитиву с размерами $>$ расстояний между оставшимися объектами \Rightarrow область локализации

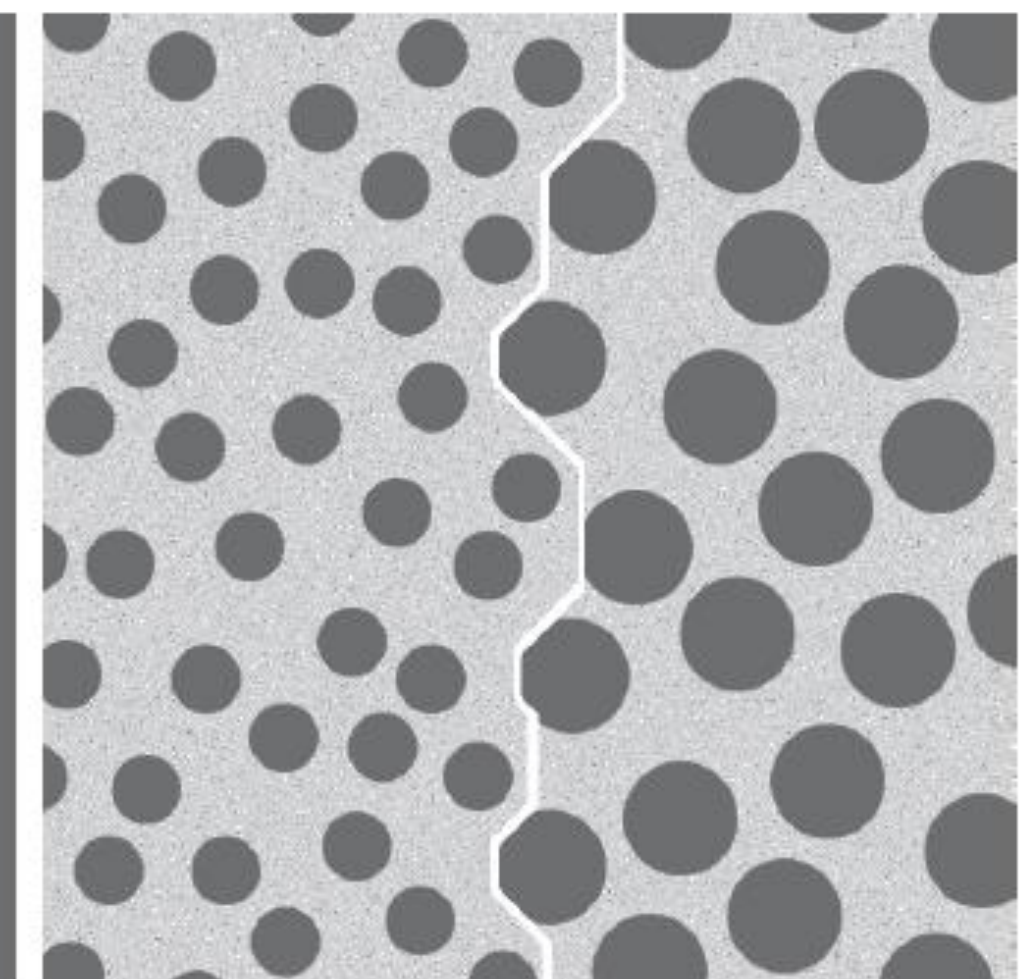
Исходное изображение



Пятна меньшего размера удалены операцией замыкания



Просветы между пятнами большего размера удалены размыканием



Исходное изображение с наложенной границей между двумя областями

- Основы теории света
- Цветовые модели RGB и HSI
- Принципы обработки цветных изображений
- Морфологическая обработка бинаризованных изображений
- Морфологическая обработка полутоновых изображений

Спасибо за внимание!

**Колокольников
Георгий Андреевич**

Telegram: @Georg_Bell

E-mail: geokolok5@gmail.com

Сайт: <https://github.com/GeorgBell>

Использованные материалы:

- Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2012. – 1104 с. – ISBN 978-5-94836-331-8.2.
- Курс лекций cs231n «Convolutional Neural Networks for Visual Recognition» (<http://cs231n.stanford.edu>).
- Курс лекций HSE «Deep Learning in Computer Vision» (<https://www.coursera.org/learn/deep-learning-in-computer-vision>)