



# ЛЕКЦИЯ 8. КОНТРАСТИРОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Демидов Д.В.

Обработка аудиовизуальной информации  
Бакалавры, 6 семестр. Магистры, 9 семестр

# План лекции

2

- Глобальное контрастирование
  - ▣ Линейное, степенное, логарифмическое преобразование
- Адаптивное контрастирование
- Улучшение резкости
  - ▣ АРЕХ-метод

# Контрастирование

Глобальное преобразование функции яркости

Адаптивное преобразование функции яркости

# Слабый контраст

4

- Предположим, что минимальная и максимальная яркости исходного изображения равны  $f_{min}$  и  $f_{max}$  соответственно.
- Если эти параметры или один из них существенно отличаются от граничных значений яркостного диапазона, то визуализированная картина выглядит либо как темная, либо как ненасыщенная, неудобная, утомляющая при наблюдении.

# Линейное контрастирование

5

- При линейном контрастировании используется линейное поэлементное преобразование вида:

$$g(n, m) = a \cdot f(n, m) + b$$

- Параметры преобразования  $a$  и  $b$  определяются желаемыми значениями минимальной  $g_{\min}$  и максимальной  $g_{\max}$  выходной яркости.

$$a = \frac{g_{\max} - g_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}} \quad b = \frac{g_{\min} f_{\max} - g_{\max} f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}}$$

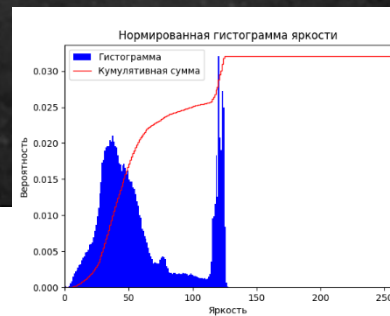
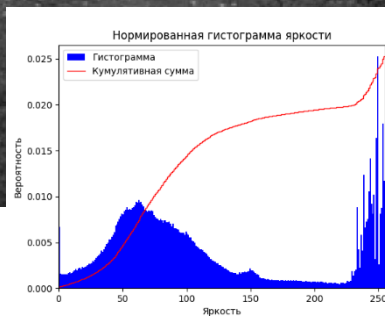
$$g = \frac{f - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}} (g_{\max} - g_{\min}) + g_{\min}$$

- Если нужно получить диапазон  $[0..255]$ , то:

$$g = 255 \frac{f - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}}$$

# Линейное контрастирование

6



# Линейное контрастирование

7



# Линейное контрастирование

при сѣѣ трѡнцѣ введѣнѣи цѣкви : вѣ тѣпографѣ  
ѣднѡвѣрцѣвѣ : вѣ лѣтѣ ѡ сотворѣнїа мїра : ЗѣЗ  
ѡ рѣтѣвѣ же по плѡти бѣа слова : ѡ ѡтѣдѣ : индиктѣ  
бѣ : мѣа генварѣ вѣ а дѣнѣ : на прѣзидѣнтѣко бѣ  
по плѡти ѡбрѣзанїа гдѣ бѣа нѣспѣа нашегѡ и  
хѣа . нѣ пѣмѣа тѣ нѣже во сѣтѣхѣ Оѣа нашегѡ  
вѣмѣа вѣлнѣагѡ : архѣепѣпа кѣсарѣи капѣпадокѣиискѣа  
ѡвѣршенѣаже бѣсѣтѣ : тогѡ же лѣтѣа : мѣа мѣртѣа  
вѣ сѣ дѣнѣ : на пѣмѣа тѣ сѣтѣхѣ мѣчѣникѣ аѣапѣа  
тѣмѡна нѣ ромѣа : нѣ нѣже сѣх нѣмѣи : сѣх кнѣи

при сѣѣ трѡнцѣ введѣнѣи цѣкви : вѣ тѣпографѣ  
ѣднѡвѣрцѣвѣ : вѣ лѣтѣ ѡ сотворѣнїа мїра : ЗѣЗ  
ѡ рѣтѣвѣ же по плѡти бѣа слова : ѡ ѡтѣдѣ : индиктѣ  
бѣ : мѣа генварѣ вѣ а дѣнѣ : на прѣзидѣнтѣко бѣ  
по плѡти ѡбрѣзанїа гдѣ бѣа нѣспѣа нашегѡ и  
хѣа . нѣ пѣмѣа тѣ нѣже во сѣтѣхѣ Оѣа нашегѡ  
вѣмѣа вѣлнѣагѡ : архѣепѣпа кѣсарѣи капѣпадокѣиискѣа  
ѡвѣршенѣаже бѣсѣтѣ : тогѡ же лѣтѣа : мѣа мѣртѣа  
вѣ сѣ дѣнѣ : на пѣмѣа тѣ сѣтѣхѣ мѣчѣникѣ аѣапѣа  
тѣмѡна нѣ ромѣа : нѣ нѣже сѣх нѣмѣи : сѣх кнѣи



# Степенные преобразования

9

- Одним из наиболее часто применяемых в обработке изображений является преобразование, называемое гамма-коррекцией:

$$g(n, m) = c \left( f(n, m) + f_0 \right)^\gamma$$

- где  $c, f_0, \gamma$  — неотрицательные константы.
- При этом функция яркости должна быть нормирована: значения должны лежать в интервале  $[0; 1]$ .
- После преобразования можно снова свести к  $[0..255]$

# Степенные преобразования

10



$$c = 1, f_0 = 0, \gamma = 0.5$$

# Степенные преобразования

11

при сѣѣ трѣнциѣ кведѣнскоѣ цркви > въ тѣпографѣ  
ѣдиновѣрцѣхъ > въ лѣто ѿ сотворѣнїа мїра & ЗѸЗ  
ѿ ржтѣа же поплоти бѣа слова & аѿѣдъ > индикт.  
ѣ > мѣа генварѣа въ а дѣнь > на прѣзднество ѣа  
поплоти обрѣзанїа гдѣа бѣа ѿ спѣа нашегѣ ѿ  
ха . ѿ пѣмѣа ѿ же во стѣхъ ѿца нашегѣ  
василѣа велїкагѣ > архїепїсѣпа кесарїн каппадокїнскїа  
сѣвершенѣа же бѣстѣ > того же лѣта > мѣа мѣрта  
въ ѣ дѣнь > на пѣмѣа стѣхъ мѣченикѣа агѣпѣа  
тїмѣона ѿ ромїла > ѿ ѿ же сѣх ѿ ѿмѣн . сѣх кнїгѣ

при сѣѣ трѣнциѣ кведѣнскоѣ цркви > въ тѣпографѣ  
ѣдиновѣрцѣхъ > въ лѣто ѿ сотворѣнїа мїра & ЗѸЗ  
ѿ ржтѣа же поплоти бѣа слова & аѿѣдъ > индикт.  
ѣ > мѣа генварѣа въ а дѣнь > на прѣзднество ѣа  
поплоти обрѣзанїа гдѣа бѣа ѿ спѣа нашегѣ ѿ  
ха . ѿ пѣмѣа ѿ же во стѣхъ ѿца нашегѣ  
василѣа велїкагѣ > архїепїсѣпа кесарїн каппадокїнскїа  
сѣвершенѣа же бѣстѣ > того же лѣта > мѣа мѣрта  
въ ѣ дѣнь > на пѣмѣа стѣхъ мѣченикѣа агѣпѣа  
тїмѣона ѿ ромїла > ѿ ѿ же сѣх ѿ ѿмѣн . сѣх кнїгѣ

$$c = 1, f_0 = 0, \gamma = 0.75$$

# Логарифмические преобразования

12

- Вычисляются
  - ▣ математическое ожидание (среднее)  $mean$ ,
  - ▣ минимальное значение яркости  $f_{min}$ ,
  - ▣ максимальное значения яркости  $f_{max}$ .
- Вычисляются два коэффициента преобразования:

$$PositiveAlpha = \frac{2^{L-1}}{\ln(\max(2, f_{max} - mean))}$$

$$NegativeAlpha = \frac{2^{L-1}}{\ln(\max(2, mean - f_{min}))}$$

# Логарифмические преобразования

13

- Для всех отсчётов (пикселей) изображения вычисляется разность яркости и среднего значения сигнала:

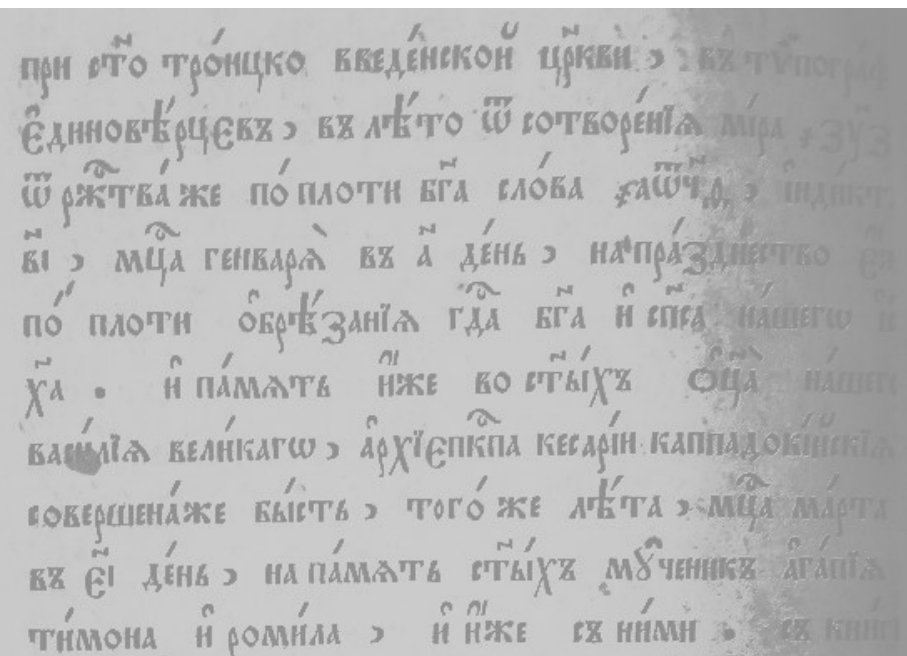
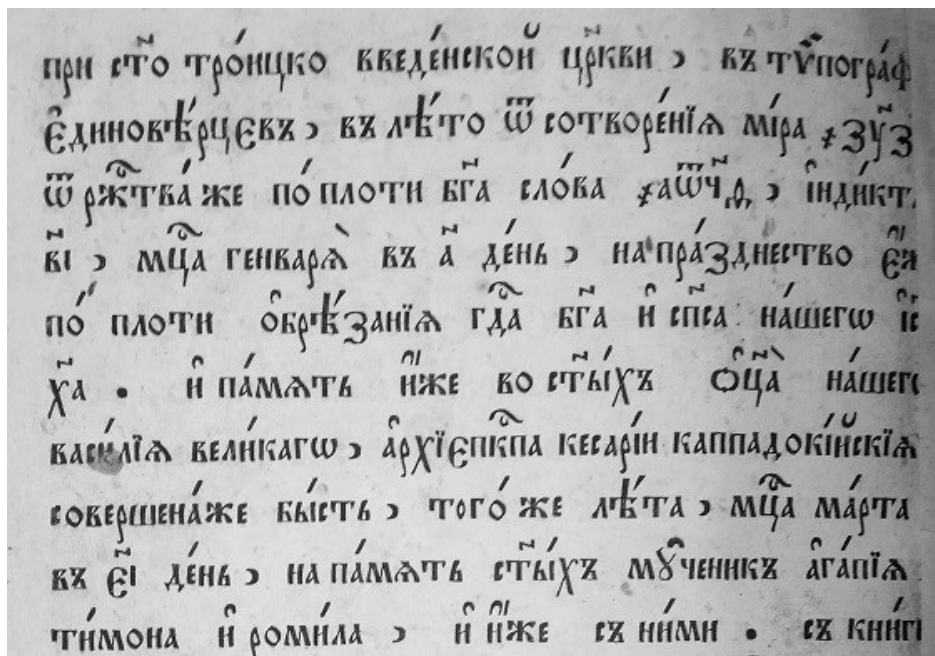
$$f' = f(n, m) - mean$$

- На основании этого значения формируется выходное изображение:

$$g(n, m) = \begin{cases} mean + \lceil PositiveAlpha \cdot \ln(f') \rceil & f' \geq 1 \\ mean - \lceil NegativeAlpha \cdot \ln(|f'|) \rceil & f' \leq -1 \\ mean & otherwise \end{cases}$$

# Пример логарифмического преобразования

14



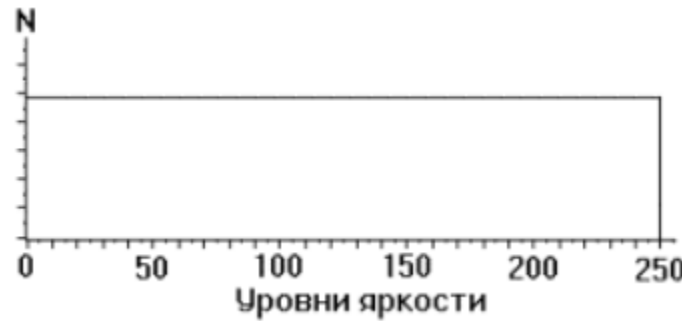
$$L = 6$$

# Эквализация гистограммы

# Эквализация гистограммы

16

- Эквализация — процедура выравнивания гистограммы изображения путём изменения яркости отдельных пикселей так, чтобы распределение пикселей по яркости приблизилось к равномерному.
- Цель преобразования — придать всем уровням яркости примерно одинаковую частоту. Тогда гистограмма станет близка к равномерному распределению:



- Для изображения  $M \times N$  и количеством уровней яркости  $L$  среднее количество пикселей каждого тона после выравнивания должно быть приблизительно равно:

$$n_0 = \frac{M \cdot N}{L}$$



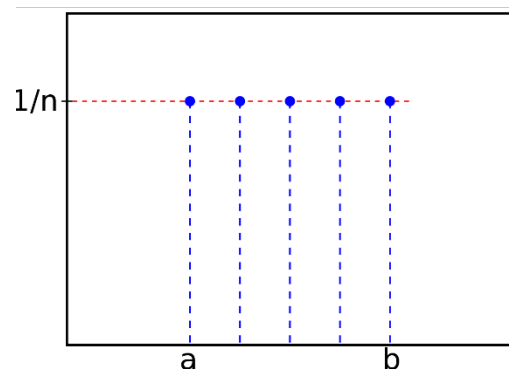
# Плотность вероятности и функция распределения вероятности

17

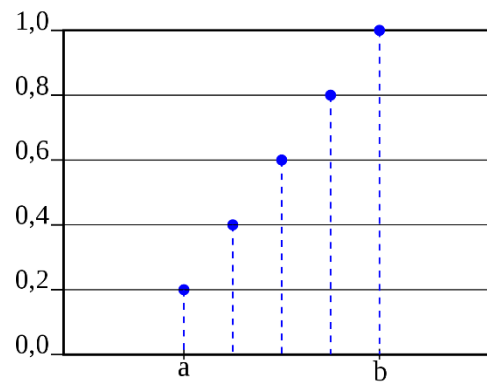
- Нормализованную гистограмму можно трактовать как плотность вероятности тонов яркости, а её кумулятивную сумму как функцию распределения вероятности.
- Ясно, что кумулятивная сумма монотонно возрастает.
- Это свойство является необходимым условием выравнивания гистограммы.

Дискретное равномерное распределение

$$p_i = \frac{n_i}{M \cdot N}$$



Функция вероятности  
Probability mass function



Функция распределения  
Cumulative distribution function

$$CDF(k) = \sum_{i=0}^k p_i$$

# Эквализация гистограммы (мат.)

18

- Новые уровни яркости  $s_k$  рассчитываются на основе гистограммы с помощью функции преобразования:

$$s_k = (L-1)CDF(k) = (L-1) \sum_{i=0}^k p_i = \frac{L-1}{N \cdot M} \sum_{i=0}^k n_i$$

- Здесь, для нормализованной гистограммы (плотности вероятности) рассчитывается её кумулятивная сумма (функция распределения).
- Умножая на  $L-1$  и округляя до ближайшего целого, получаются новые значения яркости.
- В таблице иллюстрируется эквализация гистограммы  $n_i$  при  $N = M = 512$ ,  $L = 256$ :
  - Видно, что некоторые уровни могут быть пропущены (3, 4), а некоторые прежние уровни (1, 2, 3) могут отображаться в один и тот же новый уровень (1).

Уровень яркости	0	1	2	3	4	5	6	7	8	...
Количество пикселей $n_i$	188	347	544	315	700	3012	435	230	505	
Кумулятивная сумма	188	535	1079	1394	2094	5106	5541	5771	6276	
Функция распределения CDF	0,0007	0,002	0,0041	0,0053	0,008	0,0195	0,0211	0,022	0,0239	
CDF * (L - 1)	0,1836	0,5202	1,0506	1,3566	2,0375	4,9674	5,3907	5,6126	6,1047	
Новый уровень яркости	0	1	1	1	2	5	5	6	6	...

# Эквализация гистограммы (алг.)

19

- Эквализация может быть выполнена алгоритмически. В среднем число пикселей на каждом уровне должно оказаться около  $n_0$ .
- За один проход по гистограмме пиксели перегруппировываются, занимая новые уровни яркости: при недоборе  $n_0$  соседние уровни сливаются, при кратном переборе  $n_0$  уровень разбивается на несколько.
- Например, для  $N = M = 512, L = 256: n_0 = 1024$ .

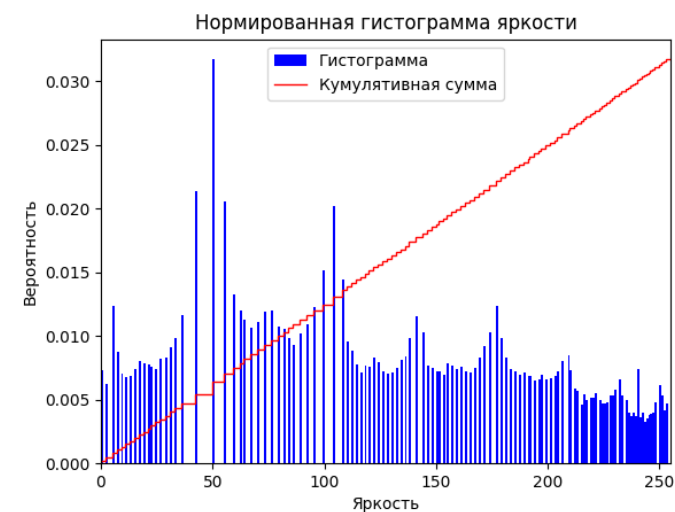
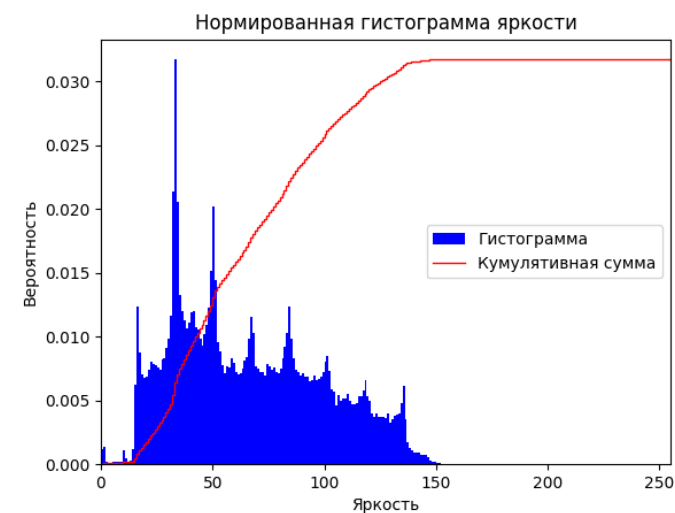
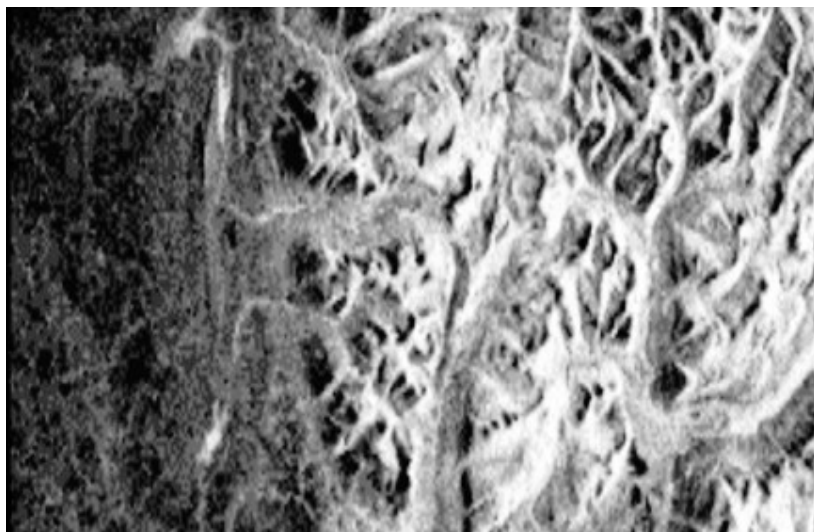
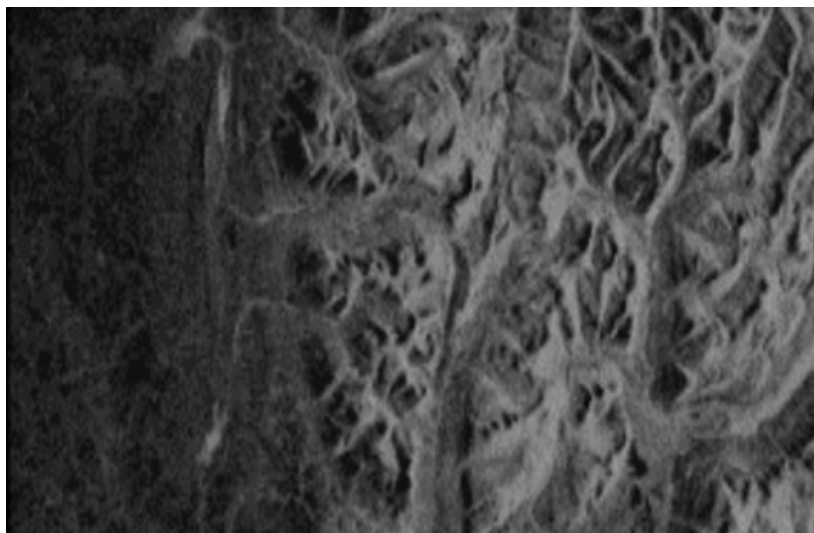
Уровень яркости	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Количество пикселей	188	347	544	315	700	3012	435	230	505

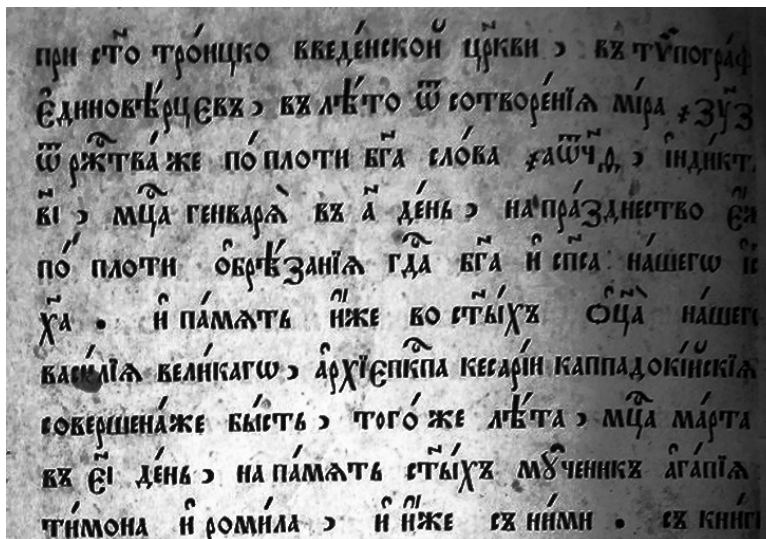
	1079 $\approx n_0$			1015 $\approx n_0$		3012 $\approx 3n_0$	1170 $\approx n_0$		
	↓			↓	↓	↓	↓		
Количество пикселей	1079	1015	3012	0	0	1170			
Новый уровень яркости	0	1	2	3	4	5	6	7	8

# Пример эквализации. Ткани

20



## 21



# Пример эквализации. Фото

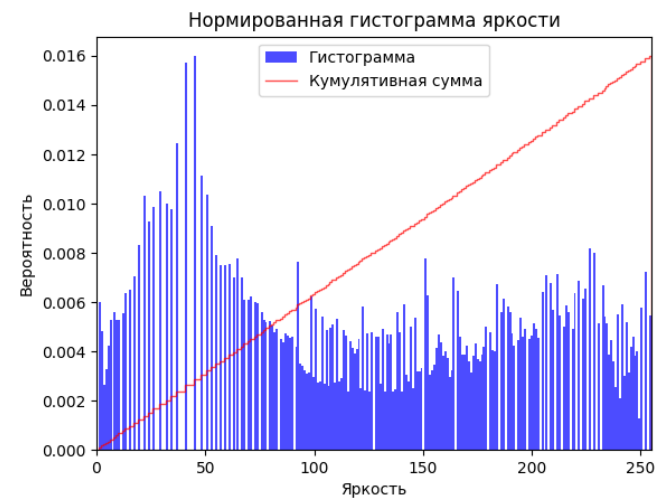
22





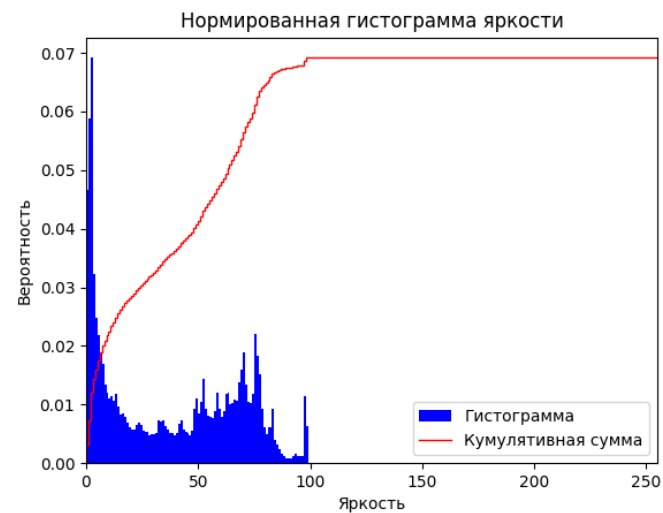
# Мост

23



# Мост (тёмное изображение)

24





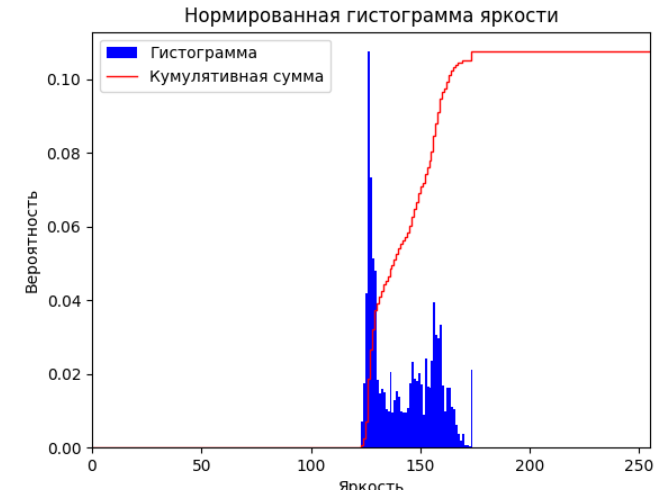
# Мост (светлое изображение)

25



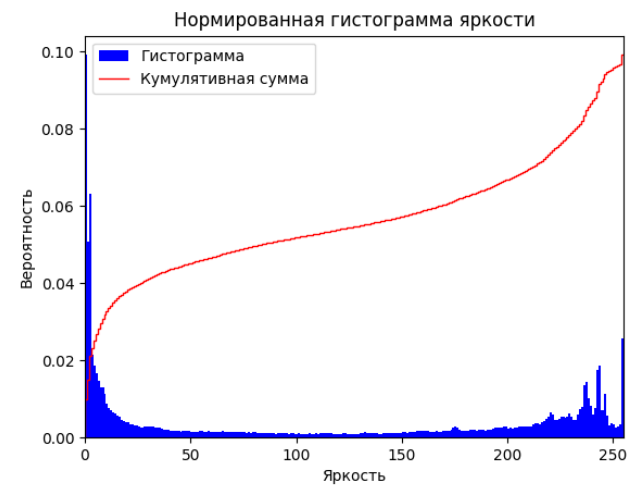
# Мост (низкоконтрастное изображение)

26



# Мост (высококонтрастное изображение)

27





# Эквализация гистограммы для цветных изображений

28

- ❑ Не применяйте эквализацию к каналам RGB. В некоторых редких случаях это позволяет добиться успеха, но в большинстве случаев цвета получаются неестественными и холодными.
- ❑ В цветовом пространстве HSI есть отдельный канал интенсивности. Именно к этому каналу и стоит применять эквализацию.



# Приведение гистограммы

# Приведение гистограммы

30

- Цель процедуры: вычислить преобразование яркости, приводящее гистограмму яркости к заданному виду
- TODO

# Адаптивное контрастирование

Локальный контраст

Локальная статистика

Нелинейное усиление локального контраста

Определение нового значения яркости

# Локальная эквализация

32

- Пусть
  - ▣  $W$  — окрестность радиуса  $r$  с центром в точке  $(i, j)$ ,
  - ▣  $f(i, j)$  — интенсивность изображения в точке  $(i, j)$ ,
  - ▣  $H(f(i, j))$  — нормированное значение гистограммы яркости в окне  $W$ .
- С помощью процедуры эквализации центральному пикселю приписывается новая яркость.
- Новую яркость достаточно выяснять только для центрального пикселя, а не всех пикселей окна. Этот факт можно использовать для оптимизации алгоритма.
- Кроме того, схема скользящего окна подразумевает, что в окне за один шаг меняется лишь левый и правый столбец (или верхняя и нижняя строка). Это также можно использовать для оптимизации.



# Локальное линейное контрастирование

33

- Рассмотрим локальные статистики окна и глобальные статистики изображения:

$$m_W = \frac{1}{(2r+1)^2} \sum_{i=0}^{L-1} f(x, y)$$

$$\sigma_W^2 = \frac{1}{(2r+1)^2} \sum_{i=0}^{L-1} (f(x, y) - m_W)^2$$

$$m_G = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{i=0}^{L-1} f(x, y)$$

$$\sigma_G^2 = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{i=0}^{L-1} (f(x, y) - m_G)^2$$

- Критериями преобразования на основе локальных статистик являются:

- Локальное мат. ожидание меньше глобального
- Локальная дисперсия меньше глобальной дисперсии, но не слишком мала

- Функция преобразования яркости:

$$g(x, y) = \begin{cases} E \cdot f(x, y) & m_W \leq k_0 \cdot m_G, \\ & k_1 \cdot \sigma_G \leq \sigma_W \leq k_2 \cdot \sigma_G \\ f(x, y) & \text{иначе} \end{cases}$$

- Используемые параметры:

- $k_0$  — для оценки отклонения от мат. ожидания
- $k_1$  — для оценки нижнего порога дисперсии
- $k_2$  — для оценки верхнего порога дисперсии
- $E$  — константа

# Локальный контраст в окрестности

34

- Пусть
  - ▣  $W$  — окрестность размером  $[n*m]$  с центром в точке  $(i, j)$
  - ▣  $L(i, j)$  — интенсивность изображения в точке  $(i, j)$
  - ▣  $H(L(i, j))$  — нормированное значение гистограммы яркости в рамках  $W$
- Момент 2-го порядка  $L(i, j)$  относительно среднего значения  $L$  в окрестности  $W$  (дисперсия):

$$\sigma^2(L) = \mu_2(L) = \sum_{(i,j) \in W} (L(i, j) - \bar{L})^2 H(L(i, j))$$

- Нормированная мера локального контраста:

$$C(i, j) = 1 - \frac{1}{1 + k \cdot \sigma^2(L)}$$

- ▣ Где  $k=0.8$  — коэффициент нормирования, причём
- ▣  $C(i, j) = 0$  при равномерной яркости в окрестности  $W$
- ▣  $C(i, j) \rightarrow 1$  при высокой дисперсии

# Локальная статистика окрестности

35

- $\varepsilon$  — энтропия,
- $\sigma$  — среднеквадратичное отклонение,
- $H_s$  — характеристика локальной скользящей окрестности

- Например, функция протяженности гистограммы:

$$H_s(W(i, j)) = \frac{L_{\max}(W(i, j)) - L_{\min}(W(i, j))}{H_{\max}(W(i, j))}$$

- Где  $L_{\max}$ ,  $L_{\min}$  — максимальное и минимальное значения яркостей элементов скользящей окрестности  $W$ ;
- $H_{\max}$  — максимальное значение гистограммы уровней яркости элементов окрестности  $W$ .

# Нелинейное преобразование локального контраста

36

- Преобразование локального контраста нелинейной монотонной функцией  $F(C(i, j))$  с учётом характеристики окрестности  $W$ :

- Где

$$C^*(i, j) = F(C(i, j)) = C(i, j)^\alpha$$

- $[a_{\min}, a_{\max}]$  — заданная область значений показателя степенной функции

$$\alpha = \alpha_{\min} + (\alpha_{\max} - \alpha_{\min}) \frac{H_s(W(i, j)) - H_{s\min}(W(i, j))}{H_{s\max}(W(i, j)) - H_{s\min}(W(i, j))}$$

# Определение нового значения яркости

37

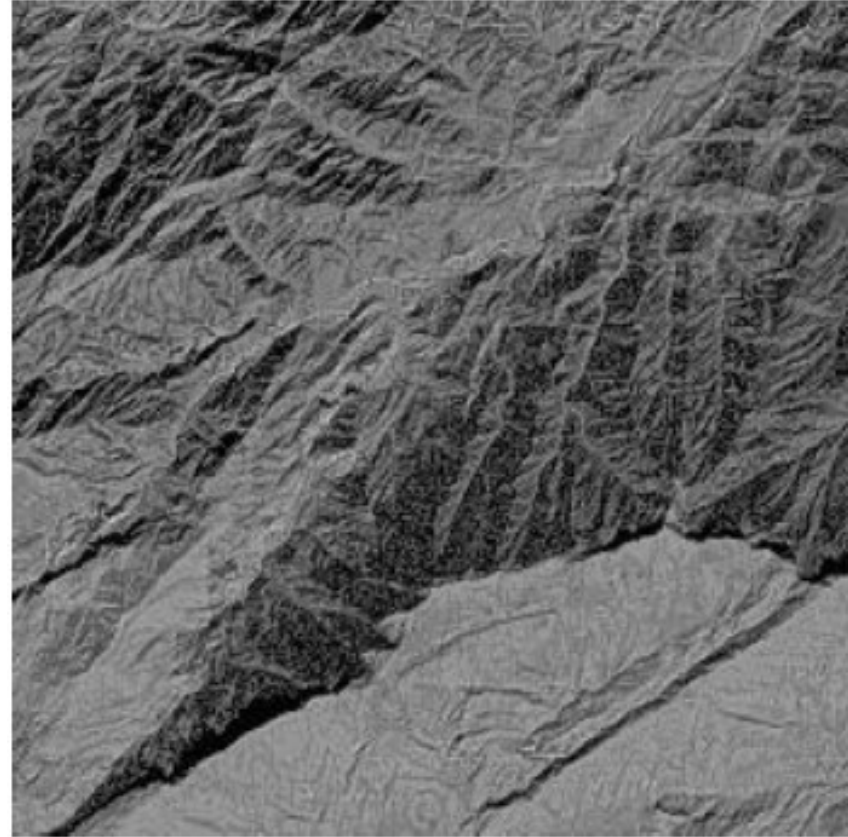
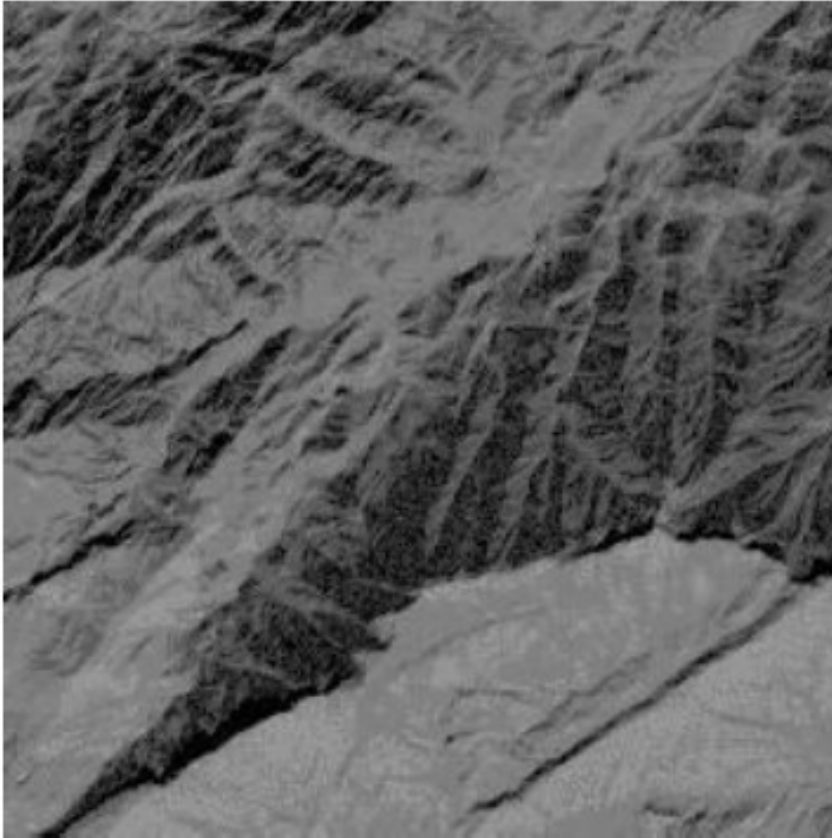
- Определение нового значения яркости  $L^*(i, j)$  на основе нового локального контраста  $C^*(i, j)$ :

$$L^*(i, j) = \bar{L}(i, j) + \sqrt{\frac{C^*(i, j) \cdot n \cdot m}{1 - C^*(i, j)} - \sum_{(i, j) \in W_2 - W_1} (L(i, j) - \bar{L}(i, j))^2 H(L(i, j))}$$

- Ограничения метода:
  - Изображения не должны содержать большого числа импульсных выбросов. Иначе это приводит к неправильному вычислению функции протяженности гистограммы.
  - Изображения не должны содержать темные или светлые области большой площади. Иначе это приведёт к неэффективному увеличению контраста.
  - Если изображение не отвечает выше перечисленным требованиям, то нужно провести его фильтрацию или градационную коррекцию.

# Пример адаптивного контрастирования

38



# Адаптивная эквализация гистограммы

39

## □ Интерполяция в т. $(x, y)$

$$m(i) = a \cdot (b \cdot m_{++}(i) + (1-b) \cdot m_{+-}(i)) + (1-a) \cdot (b \cdot m_{-+}(i) + (1-b) \cdot m_{--}(i))$$

$$a = \frac{y - y_-}{y_+ - y_-}$$

$$b = \frac{x - x_-}{x_+ - x_-}$$

$x_-, y_-$		$x_+, y_-$
	$x, y$	
$x_-, y_+$		$x_+, y_+$

## □ TODO

# Адаптивная эквализация гистограммы с ограничением контраста

40

- CLANE
- TODO



# Адаптивная эквализация гистограммы СКОЛЬЗЯЩИМ ОКНОМ

41

- SWANE
- TODO

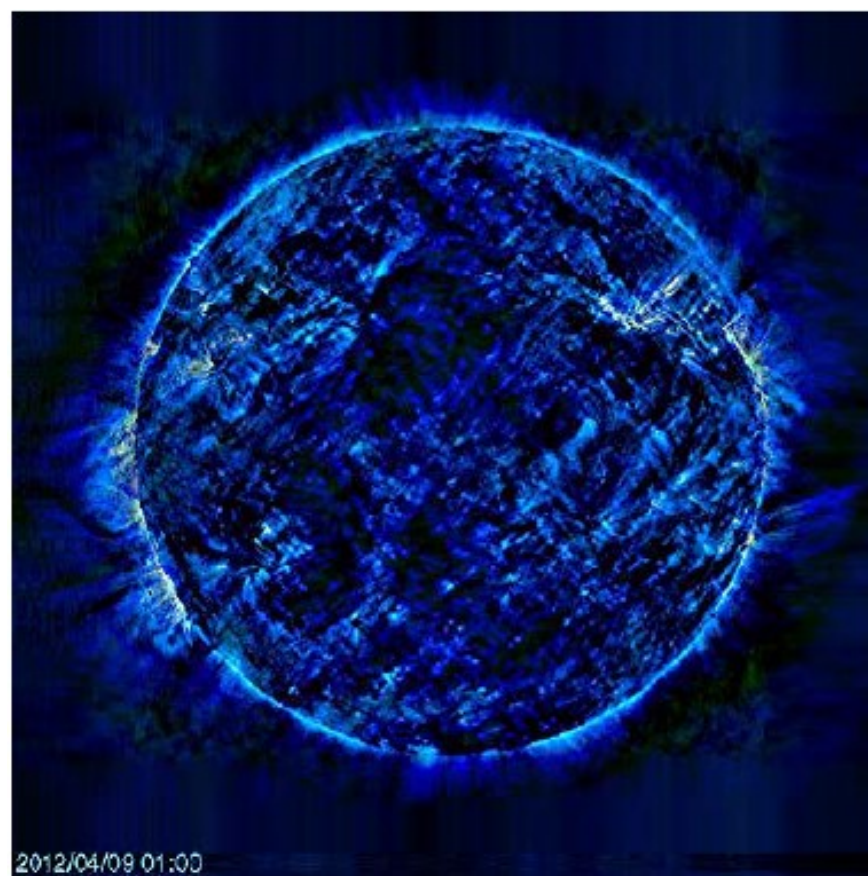
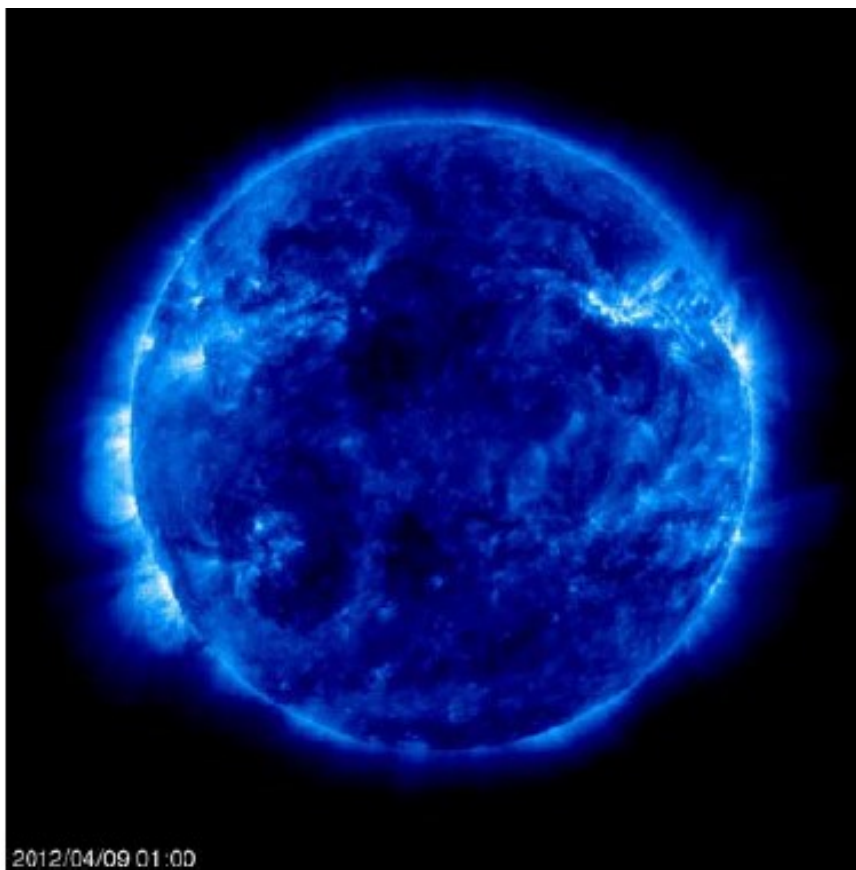
# SVD-контрастирование

42

- Факторизация Singular Value Decomposition
- Восстановление слабоконтрастных изображений на основе сингулярного разложения матрицы исходных данных, использующего логарифмическое преобразование сингулярных чисел совместно с процедурой фильтрации аддитивных помех

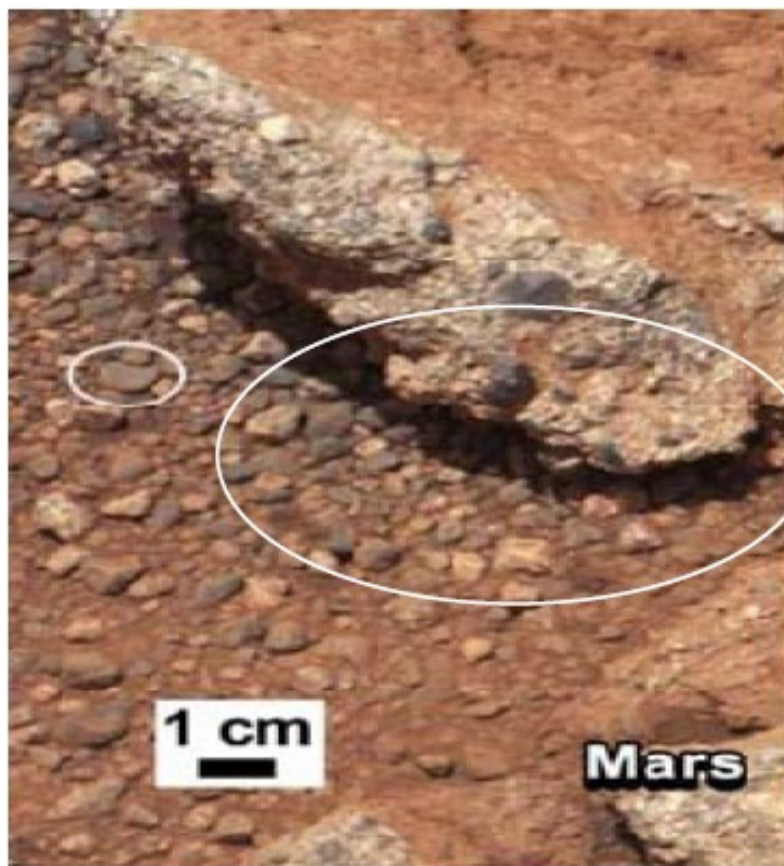
# Пример SVD-контрастирования

43



# Пример SVD-контрастирования

44



45

# Улучшение резкости

APEX-метод



# Улучшение резкости изображений

46

- Carasso A.S. et al. — APEX method and real-time blind deconvolution of scanning electron microscope imagery

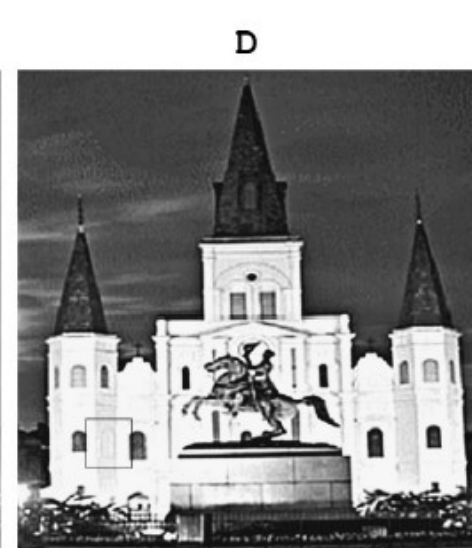
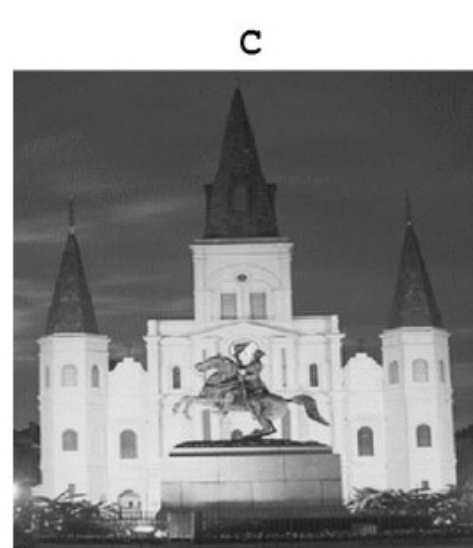
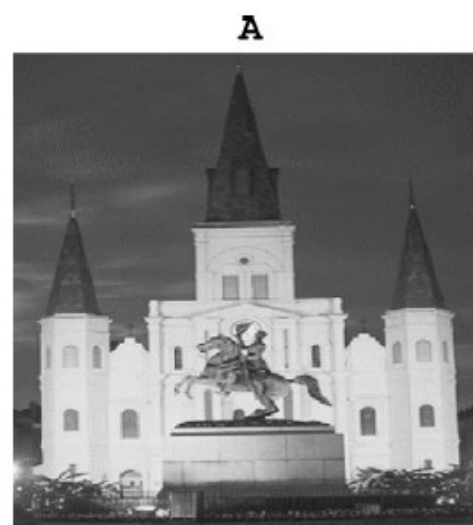
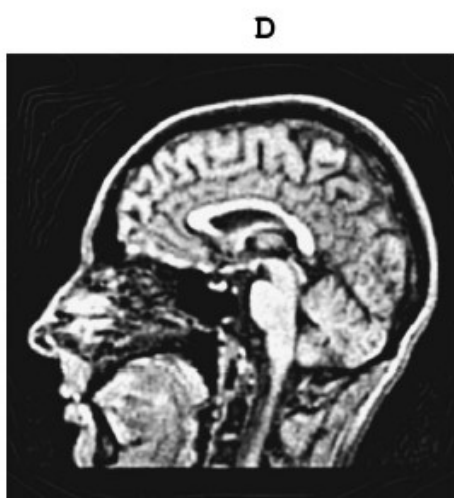
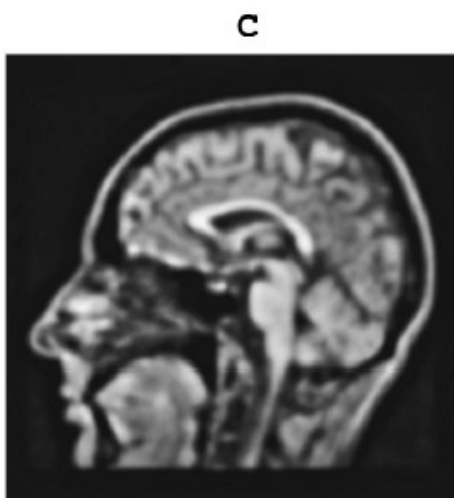
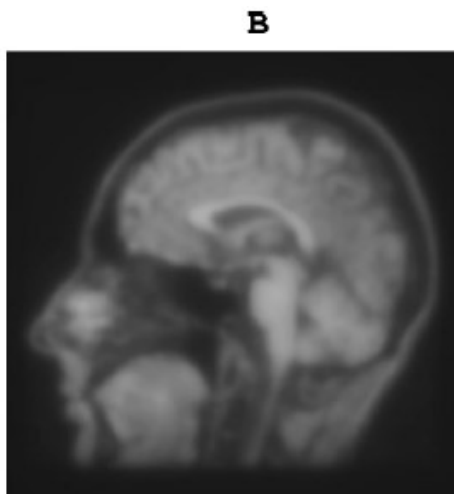
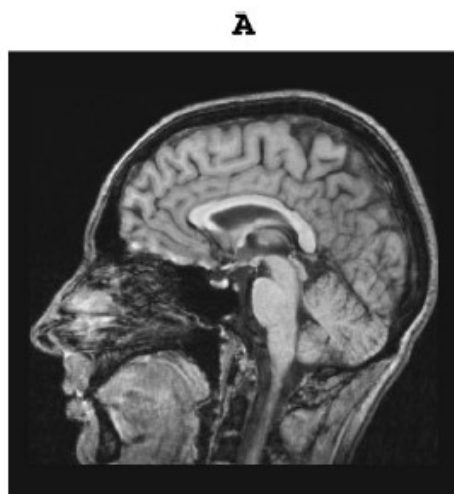


Adobe Acrobat  
Document



# АРЕХ-метод

47





# Что почитать

48

- Shaw A.: A Formal Picture Description Scheme as a Basis // Information and control 14, 9–52 (1969)
- Pizer S. M., Amburn E. P., Austin J. D., et al.: Adaptive Histogram Equalization and Its Variations. Computer Vision, Graphics, and Image Processing 39 (1987) 355-368.
- Zuiderveld K.: Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization. In: P. Heckbert: Graphics Gems IV, Academic Press 1994.
- Sund T., Møystad A.: Sliding window adaptive histogram equalization of intra-oral radiographs: effect on diagnostic quality. Dentomaxillofac Radiol. 2006 May; 35(3):133-8.
- Kumar et al.: Image Contrast Enhancement using DWT-SVD based Masking Technique, 2017.
- Хорошевский В. Ф. Об одном методе семантической интерпретации паттернов данных на основе структурного подхода : препринт WP7/2012/08 [Текст] / В. Ф. Хорошевский; НИУ «Высшая школа экономики». — М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2012.
- Фисенко В.Т., Фисенко Т.Ю. Компьютерная обработка и распознавание изображений: учеб. пособие. — СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. — 192 с.
- Рубис, Визильтер et al. Морфологическая фильтрация изображений на основе взаимного контрастирования '2016.
- Дмитриев, Бауков. Разработка алгоритма улучшения контраста видеоизображений '2023.
- Борисова И. Цифровые методы обработки информации. ISBN: 978-5-7782-2448-3
- Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. Издание 3-е, исправленное и дополненное. Москва: Техносфера, 2012. — 1104 с.
- Журавель И.М. Краткий курс теории обработки изображений, 1999 [Электронный ресурс]  
<http://matlab.exponenta.ru/imageprocess/book2/index.php>