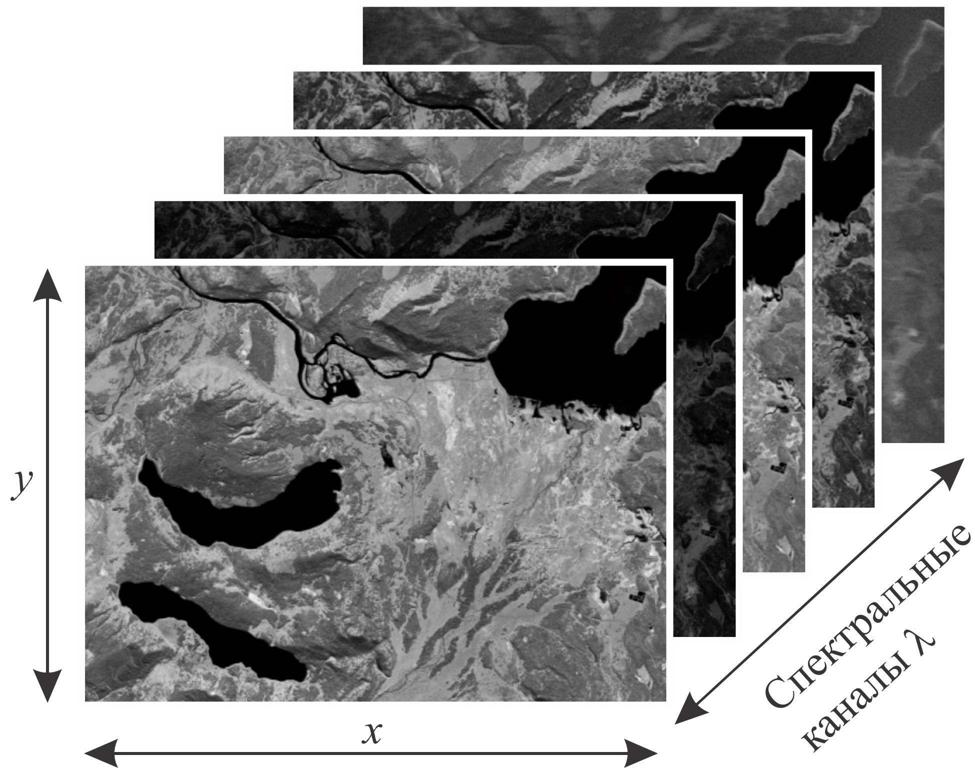
Сжатие гиперспектральных данных на основе метода кодирования с преобразованием

Чичева М.А., Юзькив Р.Р.
ИСОИ РАН

Гиперспектральные данные

- Трехмерный массив, состоящий из ряда изображений одного и того же участка земной поверхности, полученных в разных спектральных диапазонах
  - Двухбайтные данные, то есть целые числа в диапазоне от 0 до 65535
  - Большой объем данных => Необходима компрессия



Метод кодирования с преобразованием

- Компрессия
  - Данные разбиваются на блоки равного размера
  - В каждом блоке выполняется дискретное преобразование (обратимость, концентрация информации)
  - Отбор полученных трасформант (дисперсионный критерий)
  - Квантование и кодирование.
- Декомпрессия
  - Декодирование и деквантование
  - Обратное преобразование в блоках

Компрессия трехмерных данных

- Гиперспектральные данные =
  = трехмерный массив: $\left\{f\left(n_1,n_2,n_3\right)\right\}_{n_1,n_2,n_3=0}^{N_1-1,N_2-1,N_3-1}$
  - N_1, N_2 – пространственные размеры изображения;
  - N_3 – количество спектральных каналов.
- Показатели качества компрессии
  - $K_c = V_0 / V$ – коэффициент сжатия;
  - $PSNR = 10\log_{10}\left(f_{\max}^2 / \varepsilon_f^2\right)$ - пиковое отношение сигнал/шум;
  - $\varepsilon_f^2 = \frac{1}{N_1 N_2 N_3} \sum\limits_{(n_1,n_2,n_3)} \left(f_в\left(n_1,n_2,n_3\right) - f\left(n_1,n_2,n_3\right)\right)^2$

    - среднеквадратичная ошибка восстановления

Компрессия трехмерных данных

- Разбиение на блоки (8×8×8)
- Трехмерное ДКП:

$$F(m_1,m_2,m_3)=\sum_{n_1=0}^{N-1}\sum_{n_2=0}^{N-1}\sum_{n_3=0}^{N-1} f(n_1,n_2,n_3)\,h_{m_1}(n_1)\,h_{m_2}(n_2)\,h_{m_3}(n_3),$$

$$h_m(n)=\lambda_m \cos\frac{\pi(2n+1)m}{2N},\quad \lambda_m=\begin{cases}\sqrt{1/N} & \text{при } m=0,\\ \sqrt{2/N} & \text{при } m\neq 0.\end{cases}$$

- Отбор, квантование и кодирование трансформант:
  - каждая трансформанта квантуется и кодируется двоичными словами длины $b_{\mathbf{m}}$, где $\mathbf{m}=(m_1, m_2, m_3)$ - номер трансформанты в блоке.

Отбор трансформант (распределение бит)

- Суммарная длина всех кодовых слов определяется требуемым коэффициентом сжатия:

$$b = \sum_{\mathbf{m}} b_{\mathbf{m}}$$

- Необходимые понятия

$$\underset{\text{квантованное значение}}{\bar{F}(\mathbf{m})} = \underset{\text{исходное значение}}{F(\mathbf{m})} + \underset{\text{ошибка квантования}}{e(\mathbf{m})},$$

$$b(\mathbf{m}) = 0 \quad \Rightarrow \quad \bar{F}(\mathbf{m}) = 0 \quad \Rightarrow \quad e(\mathbf{m}) = -F(\mathbf{m})$$

  - Рассматриваем значения трансформант с одним и тем же номером **m** в каждом блоке как реализации одной случайной величины.

Алгоритм квазиоптимального отбора существенных трансформант

- Дисперсия ошибки квантования каждой трансформанты:

$$E\left\{e^2(\mathbf{m})\right\} = \underbrace{\sigma_F^2(\mathbf{m})}_{\text{дисперсия трансформанты } F(\mathbf{m})} \cdot \underbrace{Q_{\mathbf{m}}(b_{\mathbf{m}})}_{\text{характеристика квантователя}},$$

  - Характеристика квантователя - отношение ошибки квантования к дисперсии квантуемого сигнала.

- Дисперсия ошибки восстановления по всему изображению:

$$\varepsilon(\mathbf{n}) = \bar{f}(\mathbf{n}) - f(\mathbf{n}); \qquad \varepsilon_f^2 = \frac{1}{N^3} \sum_{\mathbf{n}} E\left\{\varepsilon^2(\mathbf{n})\right\} = \sum_{\mathbf{m}} \rho_{\mathbf{m}} Q_{\mathbf{m}}(b_{\mathbf{m}})$$

Алгоритм квазиоптимального отбора существенных трансформант

- Пусть $\forall \mathbf{m} : b_{\mathbf{m}} = 0 \;\Rightarrow\; Q_{\mathbf{m}}(0) = 1 \;\Rightarrow\; \varepsilon_f^2 = \sum_{\mathbf{m}} \rho_{\mathbf{m}} = \sum_{\mathbf{m}} \sigma_F^2(\mathbf{m}).$

1. Поочередно добавлять один разряд к каждому кодовому слову: $b_{\mathbf{m}} = b_{\mathbf{m}} + 1.$
2. Определить уменьшение ошибки ε_f^2 в этом случае: $\xi_{\mathbf{m}} = \left(Q_{\mathbf{m}}(b_{\mathbf{m}}) - Q_{\mathbf{m}}(b_{\mathbf{m}} + 1)\right)\rho_{\mathbf{m}}.$
3. Выбрать $\mathbf{k} = \operatorname{Arg}\max_{\mathbf{m}} \xi_{\mathbf{m}}.$
4. Зафиксировать увеличение $b_{\mathbf{k}}$, остальные $b_{\mathbf{m}}, \mathbf{m} \neq \mathbf{k}$ оставить без изменения.
5. Если $\sum_{\mathbf{m}} b_{\mathbf{m}} < b$ повторить шаги 1-4.

Optimal Bit Allocation (OBA)

Алгоритм по «закону логарифма дисперсий»

- Основан на предположении о нормальном распределении значений трансформант

$$b_{\mathbf{m}} = \frac{b}{N^3} + \frac{1}{2}\log_2 \frac{\sigma_F^2(\mathbf{m})}{\sigma_{gm}^2},$$

$$\sigma_{gm}^2 = \left(\prod_{\mathbf{m}} \sigma_F^2(\mathbf{m})\right)^{\frac{1}{N^3}}$$ - среднее геометрическое

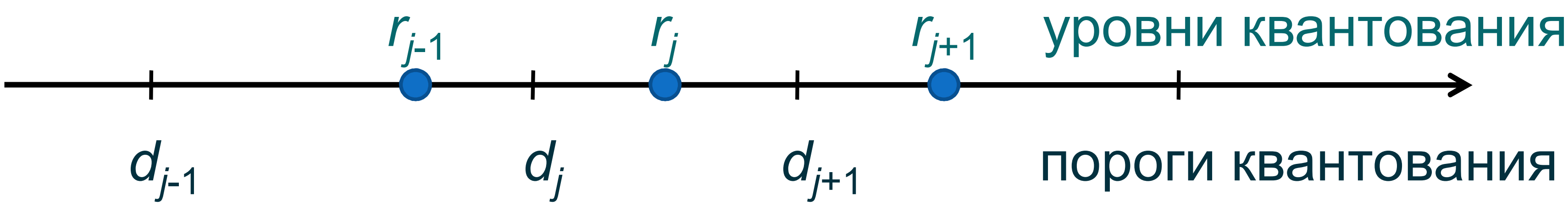
дисперсий трансформант $\sigma_F^2(\mathbf{m})$.

- Полученные значения $b_{\mathbf{m}}$ округляются до целых.
- Недостаток - при малых $b_{\mathbf{m}}$ качество ухудшается.

Fast Bit Allocation (FBA)

Квантование трансформант

- Шкала квантования



- Шкала Ллойда-Макса

(для нормального распределения):

Дисперсия трансформанты F

Математическое ожидание трансформанты F

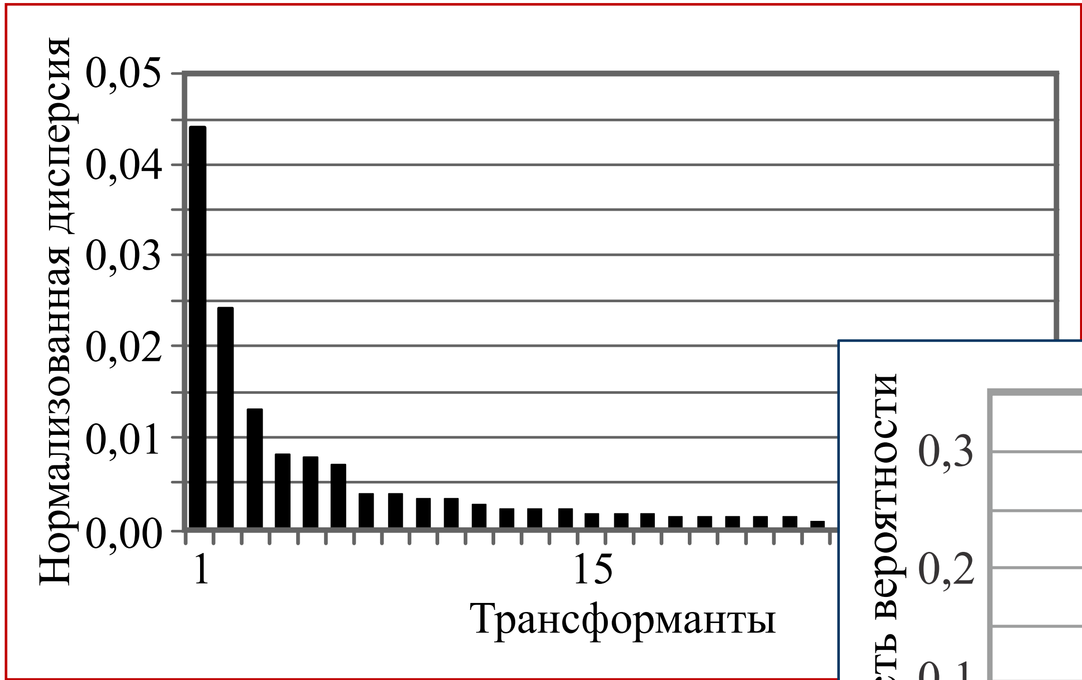
$$\begin{cases} d_j = \dfrac{r_j + r_{j-1}}{2}, \quad j = \overline{2,L}, \\ r_j = \dfrac{\sigma_F^2 \left(p(d_j) - p(d_{j+1}) \right)}{\frac{1}{2}\operatorname{erf}\left(\frac{d_{j+1} - \mu_F}{\sqrt{2}\sigma_F} \right) - \frac{1}{2}\operatorname{erf}\left(\frac{d_j - \mu_F}{\sqrt{2}\sigma_F} \right)} + \mu_F, \; j = \overline{1,L}. \end{cases}$$

Минимизирует ошибку квантования

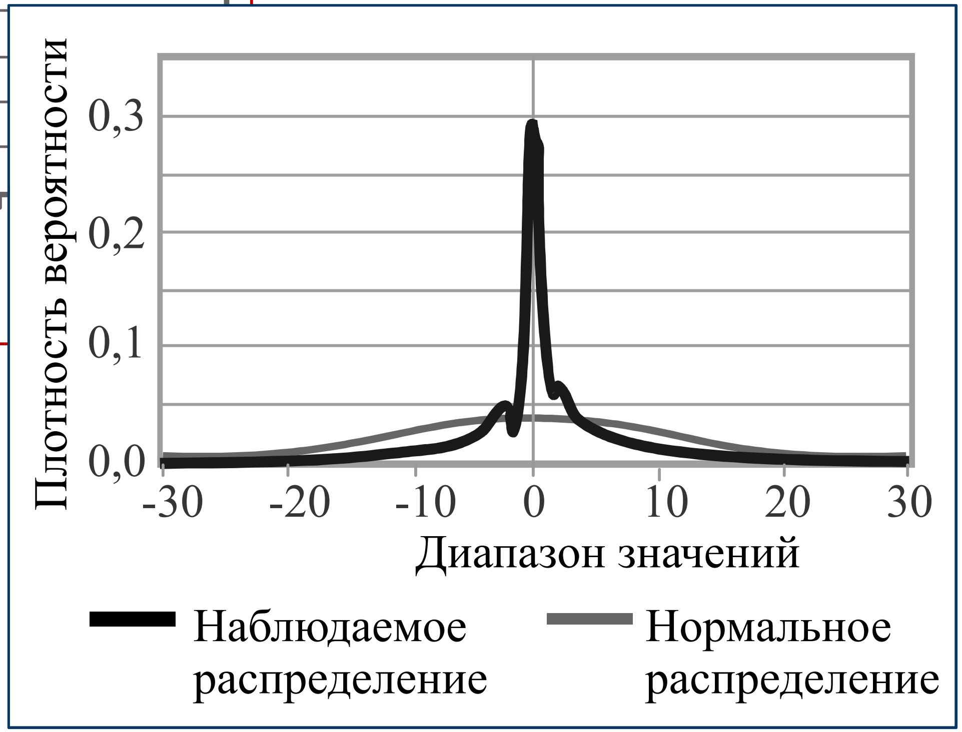
Экспериментальное исследование

- Проводилось на общедоступном наборе гиперспектральных изображений, сделанных сканером «Aviris» в 2006 году:
  - спектральных каналов 224;
  - длина волны от 400 до 2500 нм;
  - пространственное разрешение 680×512 пикселей;
  - 16 бит/отсчет.

Экспериментальное исследование



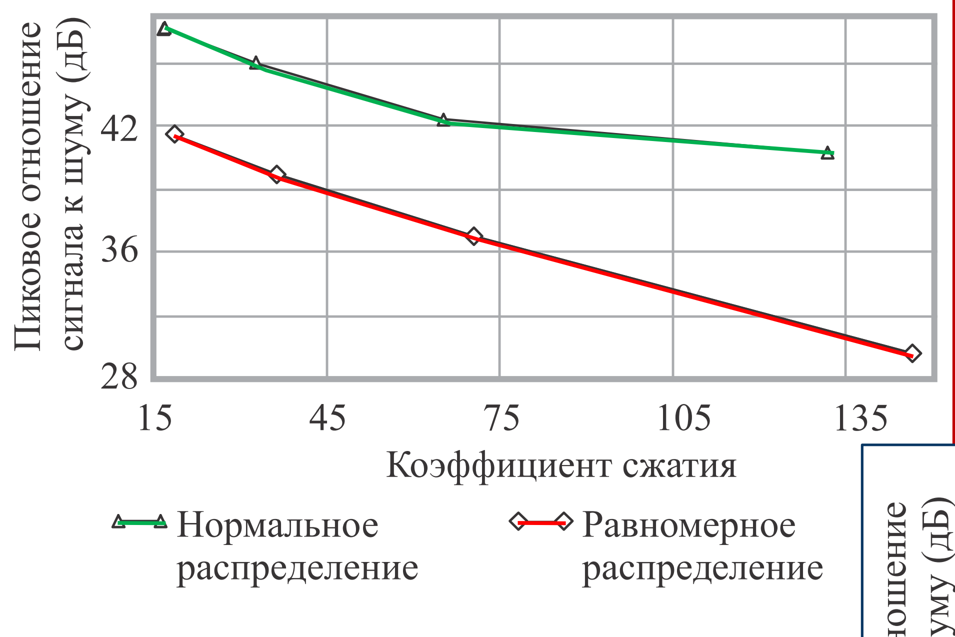
Распределение дисперсии трансформант



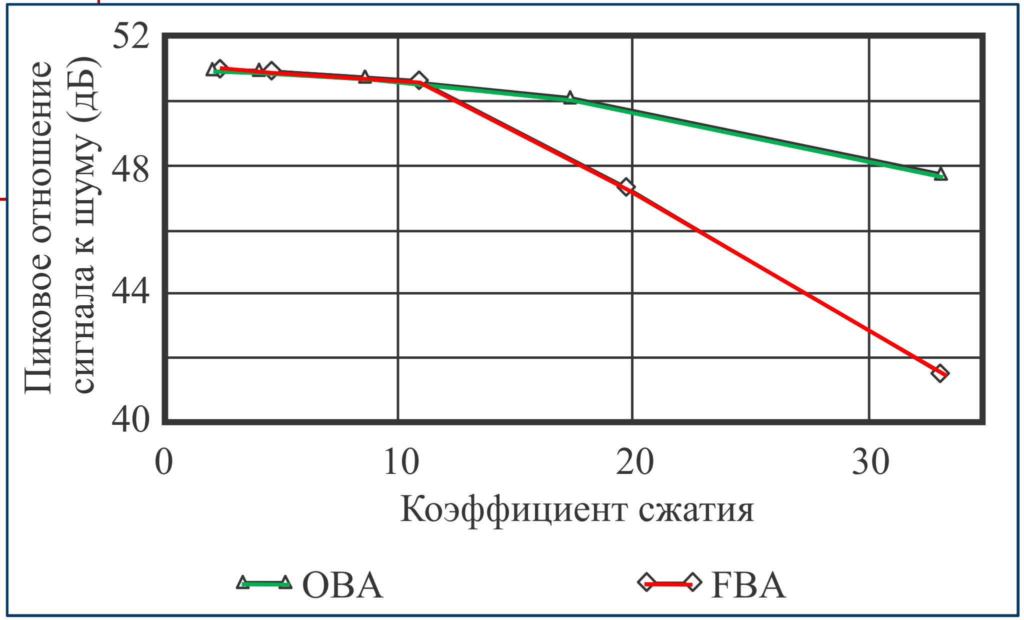
Распределение значений трансформанты

Экспериментальное исследование

Сравнение различных гипотез о распределении значений трансформант

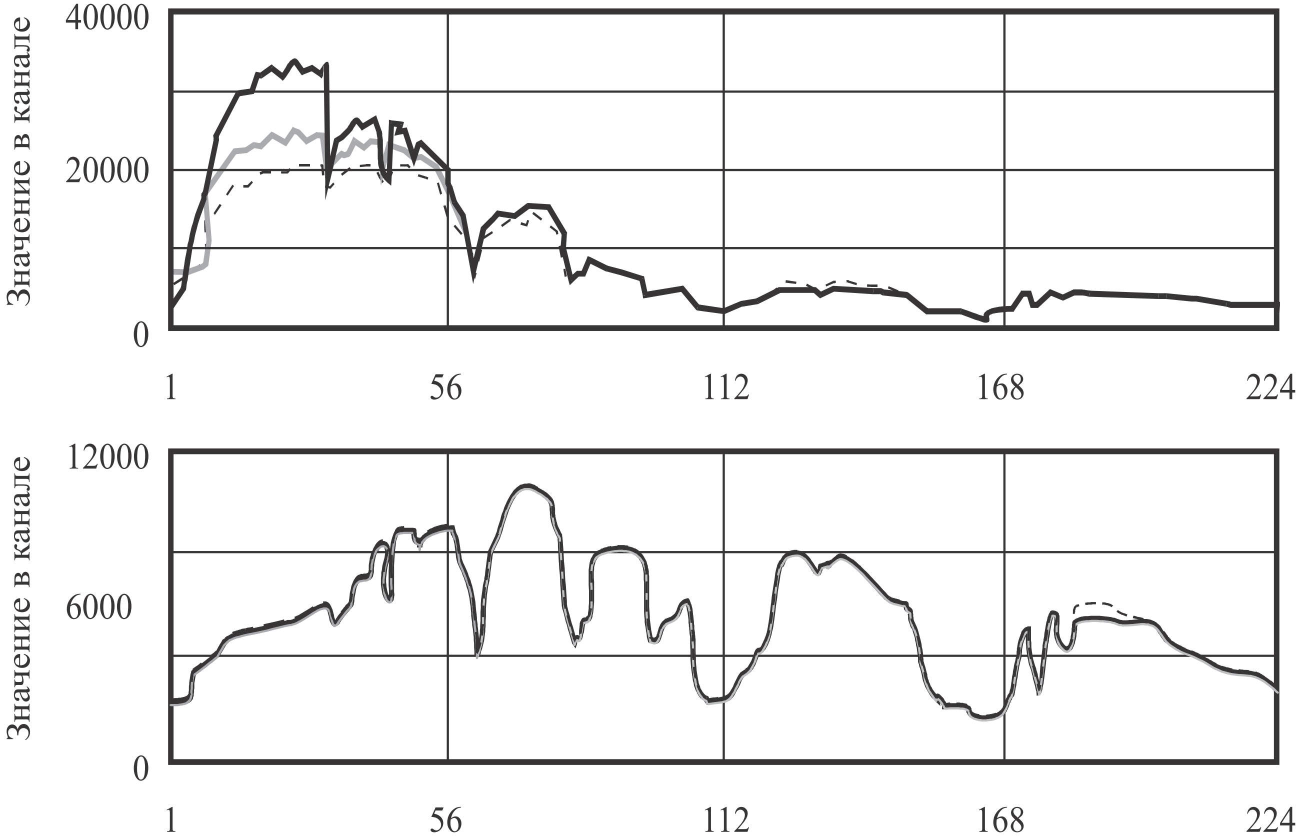


Сравнение алгоритмов распределения бит для изображения типа «ландшафт»



Экспериментальное исследование

Восстановление спектральной кривой отражения



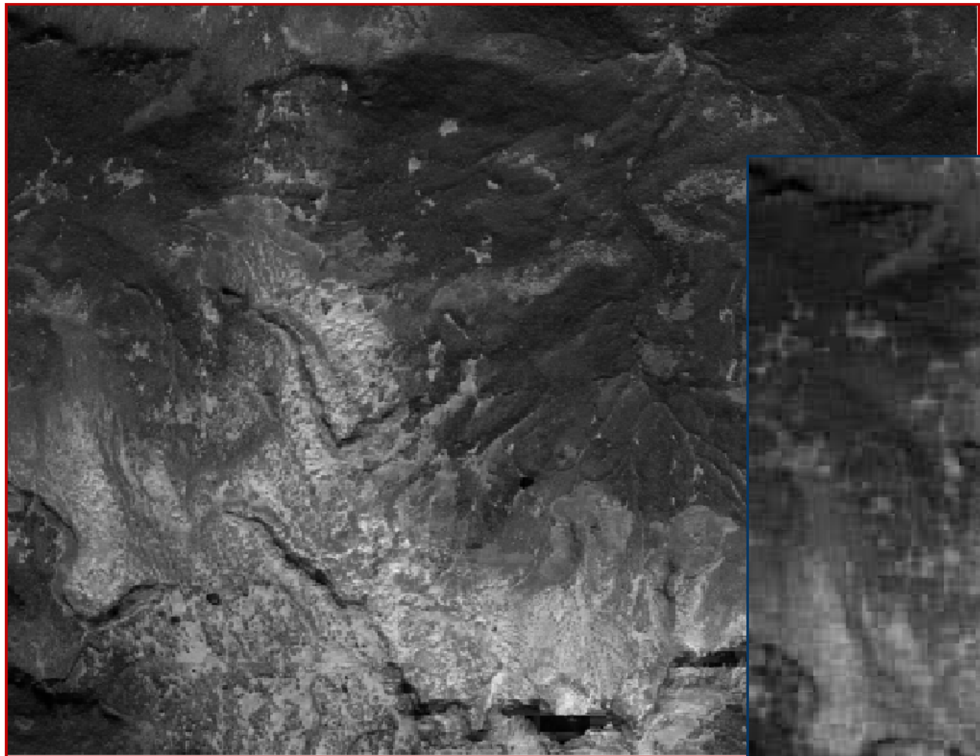
Исходная спектральная характеристика

Восстановленная кривая K_c=4,59

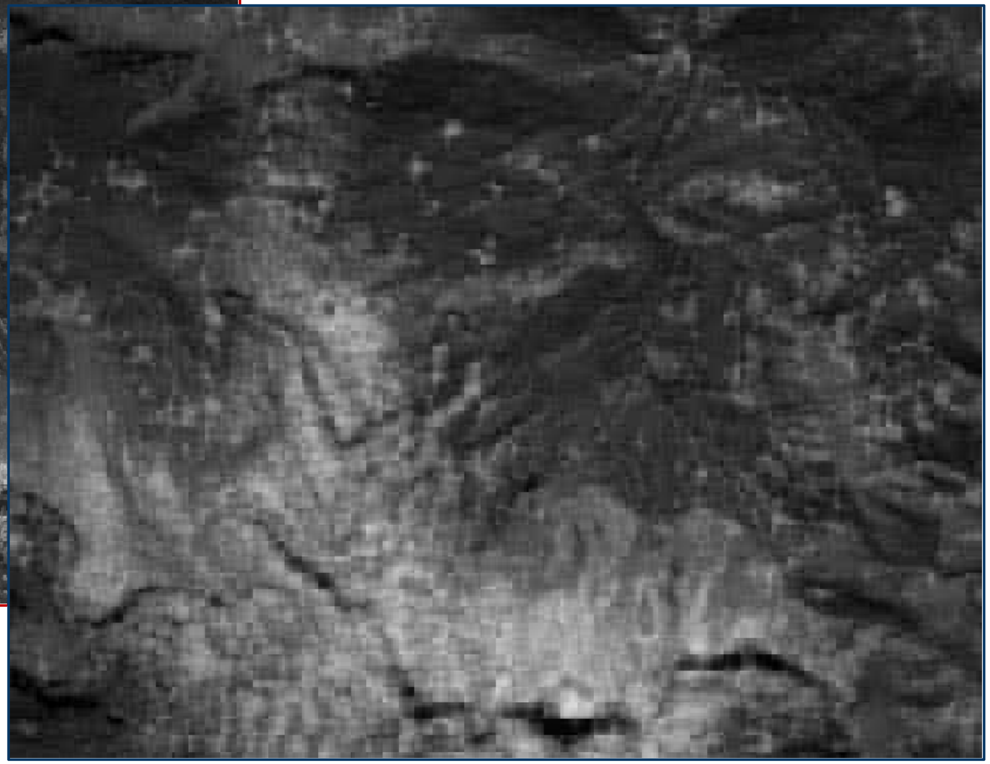
Восстановленная кривая K_c=139,63

Экспериментальное исследование

Визуальное качество

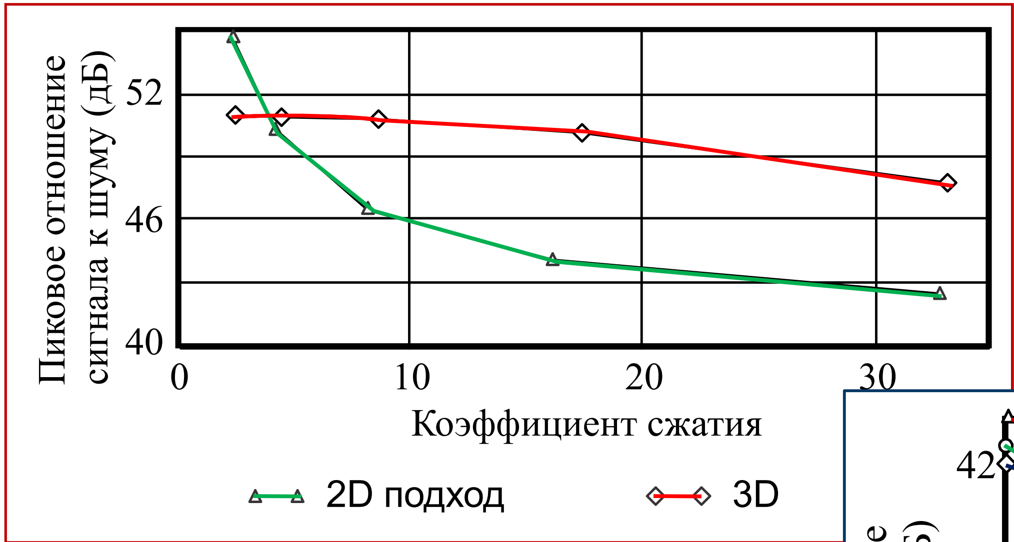


K_c=4,59



K_c=139,63

Экспериментальное исследование



Сравнение двумерного и трехмерного алгоритмов

Качество восстановления различных алгоритмов сжатия