

***Определение высоты верхней границы  
облачности по данным КМСС  
космического аппарата «Метеор-М»***

Кузнецов А.Е., Пошехонов В.И.

Рязанский государственный радиотехнический университет

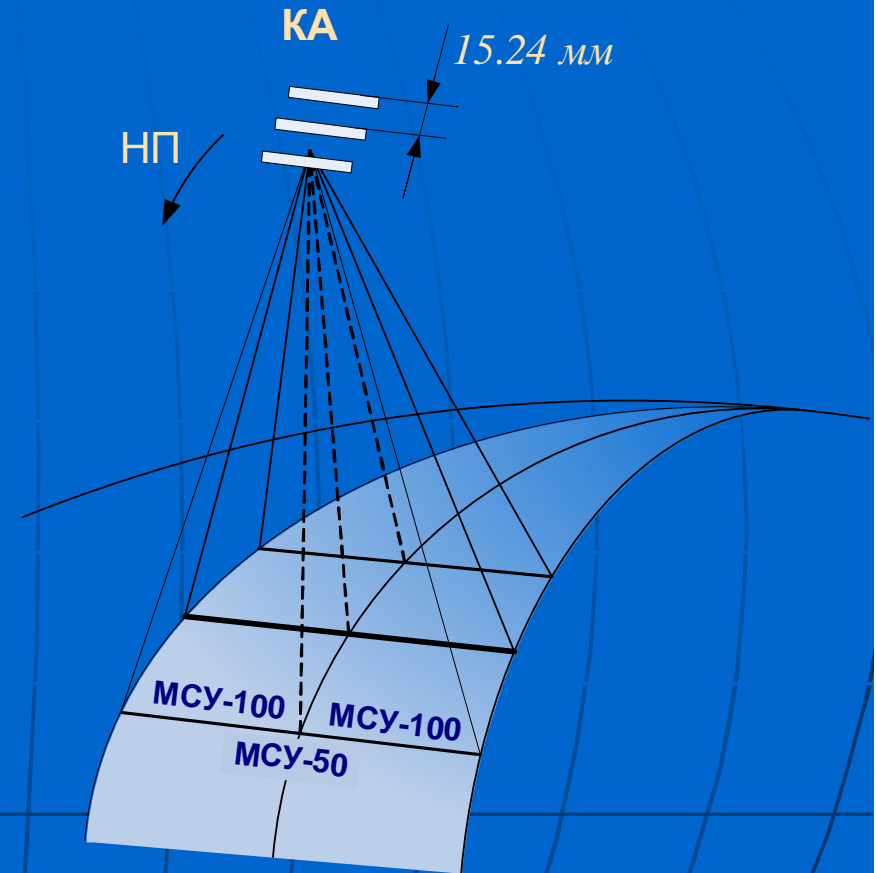
# Комплекс многозональной съемки КА «Метеор-М»

1

Аппаратура КМСС включает три многозональных съемочных устройства (МСУ): одно МСУ-50 и два МСУ-100.

Каждый сканер включает три ПЗС-линейки, установленных в фокальной плоскости с небольшим смещением вдоль направления полета КА.

- Число пикселей в строке  
7926
- Разрядность изображения  
8 бит
- Полоса захвата (МСУ-50 / МСУ-100)  
940 / 960 км
- Проекция пикселя на поверхность  
120 / 60 м
- Фокусное расстояние объектива  
50 / 100 мм



*Принцип формирования изображений  
съемочными устройствами КМСС*

# Исследование возможности стереообработки

2

## ■ Оценка точности по упрощенной модели съемки

Погрешность определения высоты  $\sigma_h$ ,

$$\sigma_h = \frac{\sigma_\delta}{B/H} = \frac{\sigma_\delta}{2 \operatorname{tg} \theta},$$

$\theta$  – отклонение визирных лучей от зенита,  $\beta$  – от надира,

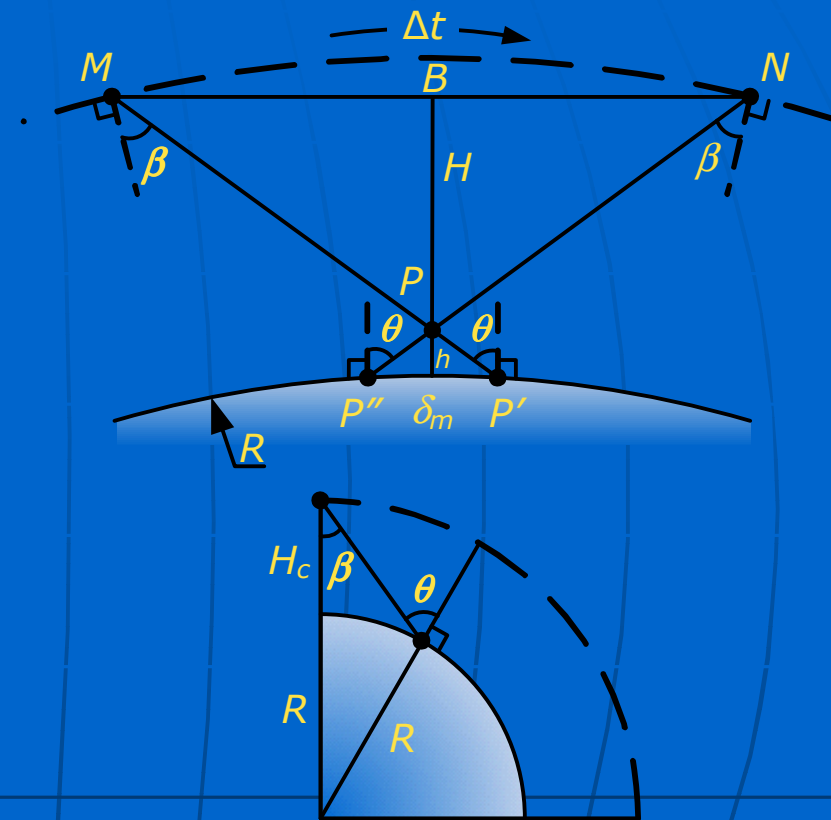
$$\theta = \arcsin \frac{(R + H_c) \sin \beta}{R}, H_c = 832 \text{ км.}$$

Расстояние между соседними ПЗС линейками в фокальной плоскости  $a = 15.24 \text{ мм.}$

Камеры МСУ-100 устанавливаются под углом  $\gamma = 14^\circ$  относительно местной вертикали,

$$\beta_{M50} = \operatorname{arctg} \frac{a}{f_{M50}}, f_{M50} = 50 \text{ мм,}$$

$$\beta_{M100} = \operatorname{arctg} \frac{a}{f_{M100} / \cos \gamma}, f_{M100} = 100 \text{ мм.}$$



Геометрия съемки вдоль направления полета КА

**МСУ-50:**  $\theta = 19.25^\circ$

**МСУ-100:**  $\theta = 9.52^\circ$

(для подспутниковой точки)

## ■ Точность определения диспаратности $\delta_m$

Погрешность измерения координат одноименных точек  $\sigma_u = 1$  пикс,  
 Прогнозируемая точность взаимной привязки изображений по данным  
 комплекса координатно-временного обеспечения (ККВО)  $\sigma_z \approx 60$  м.

$$\sigma_\delta = \sqrt{\sigma_u^2 + \sigma_z^2}$$

**МСУ-50:** 134 м

**МСУ-100:** 85 м

## ■ Влияние движения облачности

$v_m$  – скорость облачности вдоль трассы полета КА. Связанная с этим  
 погрешность определения высоты  $\sigma_h(v)$ ,

$$\sigma_h(v) = \frac{v_m \Delta t}{B/H}$$

Скорость облачности  $v_n$  поперек трассы:  $v_n = \delta_n / \Delta t$ .

Камера	Разрешение, м	$B/H$	$\Delta t$ , с	$\sigma_h$ , м	$\sigma_h(v)$ , м, при $v_m = 3$ м/с	$\sigma_{vn}$ , м/с
МСУ-50 (канал 1-3)	120	0.70	77.6	192	328	1.7
МСУ-100 (канал 1-3)	60	0.34	37.5	253	329	2.3

Совмещение снимков

Идентификация  
одноименных точек

Расчет высоты

Формирование карты  
высот, маскирование  
облачности

## ■ Создание стереопары

Совмещение исходных изображений  $I_1(m_1, n_1), I_2(m_2, n_2)$   
на основе уравнений геопривязки,

$$I_i : \varphi_i = \Phi_i(\mathbf{R}_i, \mathbf{r}_i, m_i, n_i), \lambda_i = F_i(\mathbf{R}_i, \mathbf{r}_i, m_i, n_i), i = 1, 2,$$

$\mathbf{R}$  – орбитальное положение КА в момент формирования пикселя изображения,  $\mathbf{r}$  – вектор направляющих косинусов визирного луча.

Геометрическое трансформирование:

$$\begin{cases} m_1 = \Phi_1^{-1}[\Phi_2(\mathbf{R}_2, \mathbf{r}_2, m_2, n_2), F_2(\mathbf{R}_2, \mathbf{r}_2, m_2, n_2)], \\ n_1 = F_1^{-1}[\Phi_2(\mathbf{R}_2, \mathbf{r}_2, m_2, n_2), F_2(\mathbf{R}_2, \mathbf{r}_2, m_2, n_2)], \end{cases}$$

$$I_2(m_2, n_2) \xrightarrow[n_1 = F_1^{-1}[\Phi_2(\bullet), F_2(\bullet)]]{m_1 = \Phi_1^{-1}[\Phi_2(\bullet), F_2(\bullet)]} I_2^*(m_1, n_1).$$

## ■ Идентификация одноименных точек

Из-за движения облачности между моментами съемки необходимо использовать двухмерную область поиска. Формируются карты диспарантности с помощью алгоритма глобальной оптимизации,

$$(D_m, D_n) = \arg \min_{D_m, D_n} E(D_m, D_n), \quad E(D_m, D_n) = E_y(D_m, D_n) + E_z(D_m, D_n),$$

$E_y(D_m, D_n)$  - определяет насколько функции  $D_m, D_n$ , согласуются с исходными изображениями,

$E_z(D_m, D_n)$  - задает требование кусочной гладкости функций  $D_m, D_n$ .

Поскольку облачность на спектрональных снимках представляется одинаково, то в качестве меры сходства используется нормализованная кросскорреляционная функция  $K$ ,

$$E_y(D_m, D_n) = \sum_{m,n} K[I_1(m,n), I_2^*(m + D_m(m,n), n + D_n(m,n))],$$

$$E_z(D_m, D_n) = \sum_{m,n} \rho(D_m(m,n) - D_m(m+1,n), D_n(m,n) - D_n(m+1,n)) + \\ \sum_{m,n} \rho(D_m(m,n) - D_m(m,n+1), D_n(m,n) - D_n(m,n+1)),$$

где  $\rho(\Delta_m, \Delta_n)$  – функция штрафов.

## ■ Расчет высоты

Для одноименных точек  $I_1(m_1, n_1), I_2(m_2, n_2)$  определяются координаты объекта  $\mathbf{P}(X, Y, Z)$  в гринвичской геоцентрической системе координат

$$\begin{cases} \mathbf{P} = \mathbf{r}_1 \rho_1 + \mathbf{R}_1, \\ \mathbf{P} = \mathbf{r}_2 \rho_2 + \mathbf{R}_2, \end{cases} \quad \mathbf{r}_0 = \frac{\mathbf{r}_1 \times \mathbf{r}_2}{|\mathbf{r}_1 \times \mathbf{r}_2|^2}, \quad \mathbf{R}_0 = \mathbf{R}_2 - \mathbf{R}_1, \quad \begin{cases} \mathbf{P}_1 = \mathbf{r}_1 [(\mathbf{R}_0 \times \mathbf{r}_2) \cdot \mathbf{r}_0] + \mathbf{R}_1, \\ \mathbf{P}_2 = \mathbf{r}_2 [(\mathbf{R}_0 \times \mathbf{r}_1) \cdot \mathbf{r}_0] + \mathbf{R}_2, \end{cases}$$

$$\mathbf{P} = (\mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_2) / 2, \quad v_n = \frac{|\mathbf{P}_2 - \mathbf{P}_1|}{\Delta t},$$

где  $\mathbf{P}_1\mathbf{P}_2$  – кратчайший отрезок соединяющий визирные лучи,  
 $v_n$  – скорость облачности поперек трассы КА.

Геодезические координаты:

$$\varphi = \arctg \frac{Z + e^2 L \sin \varphi}{\sqrt{X^2 + Y^2}}, \quad \lambda = \arctg \frac{Y}{X}, \quad h = X \sec \lambda \sec \varphi - L.$$

- Карта  $h(\varphi, \lambda)$  формируется в результате обработки всех одноименных точек.
- Маскирование облачности по критериям:

$$h(\varphi, \lambda) - h_{\text{ЦМР}}(\varphi, \lambda) \geq 1 \text{ км}, \quad v_n(\varphi, \lambda) \geq 5 \text{ м/с},$$

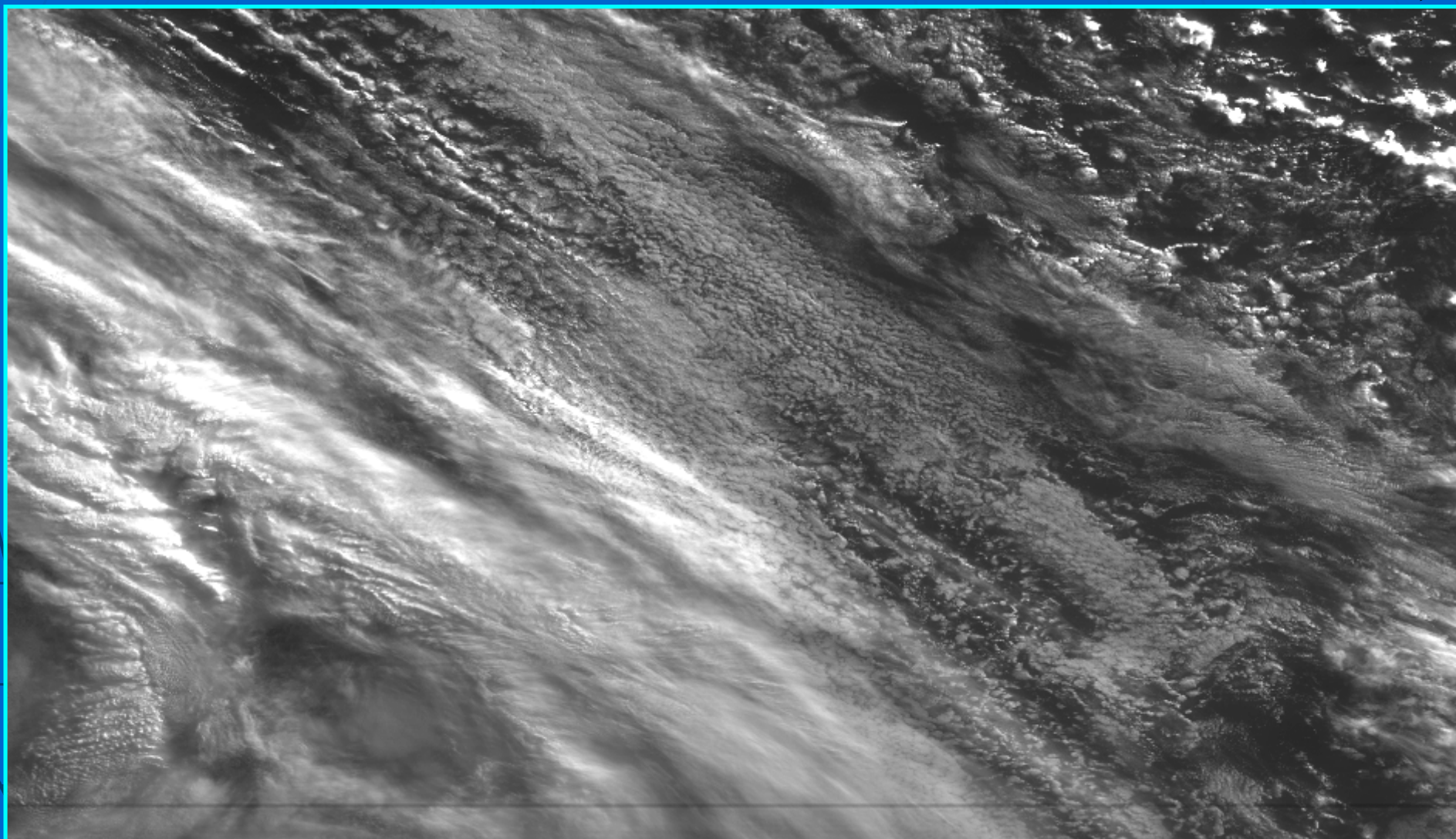
где  $h_{\text{ЦМР}}(\varphi, \lambda)$  – высота объектов земной поверхности, определяемая по цифровым моделям рельефа (ЦМР) SRTM3, GTOPO30.

# Апробация на реальных данных

7

- Исходное изображение, МСУ-100, канал №1

НП КА



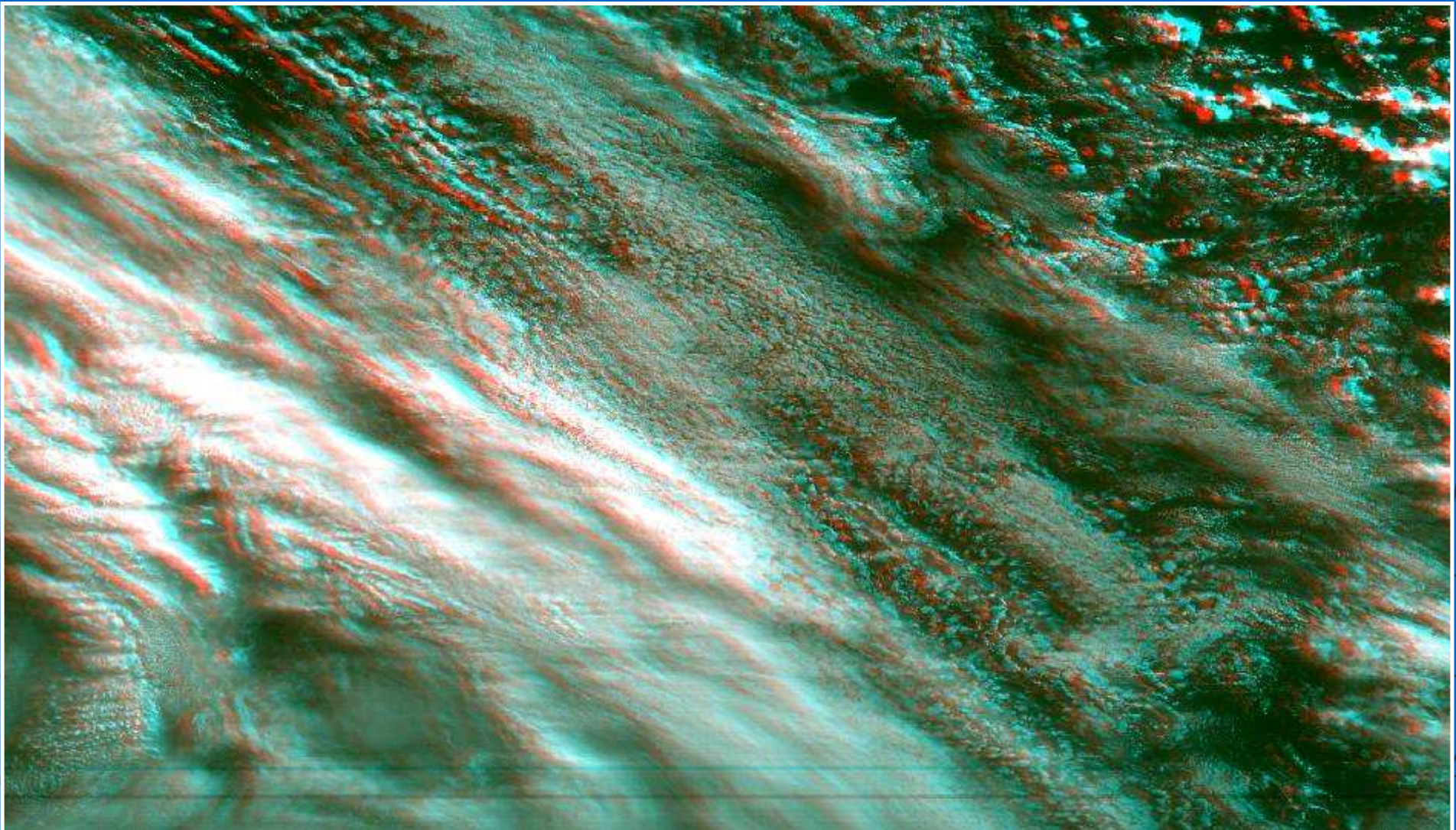


# Апробация на реальных данных

8

- Создание стереопары (анаглифическое стереоизображение)

НП КА

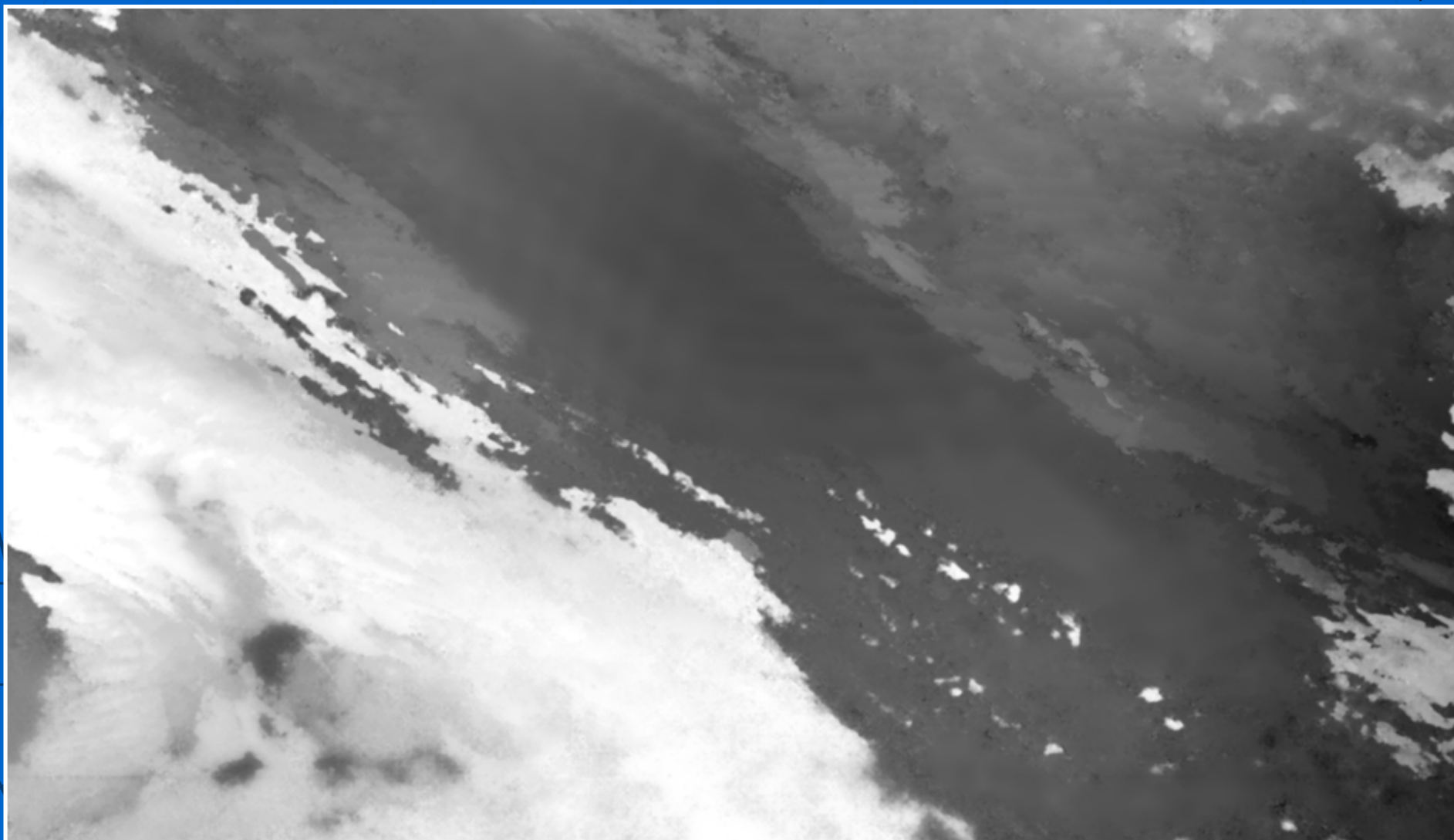


# Апробация на реальных данных

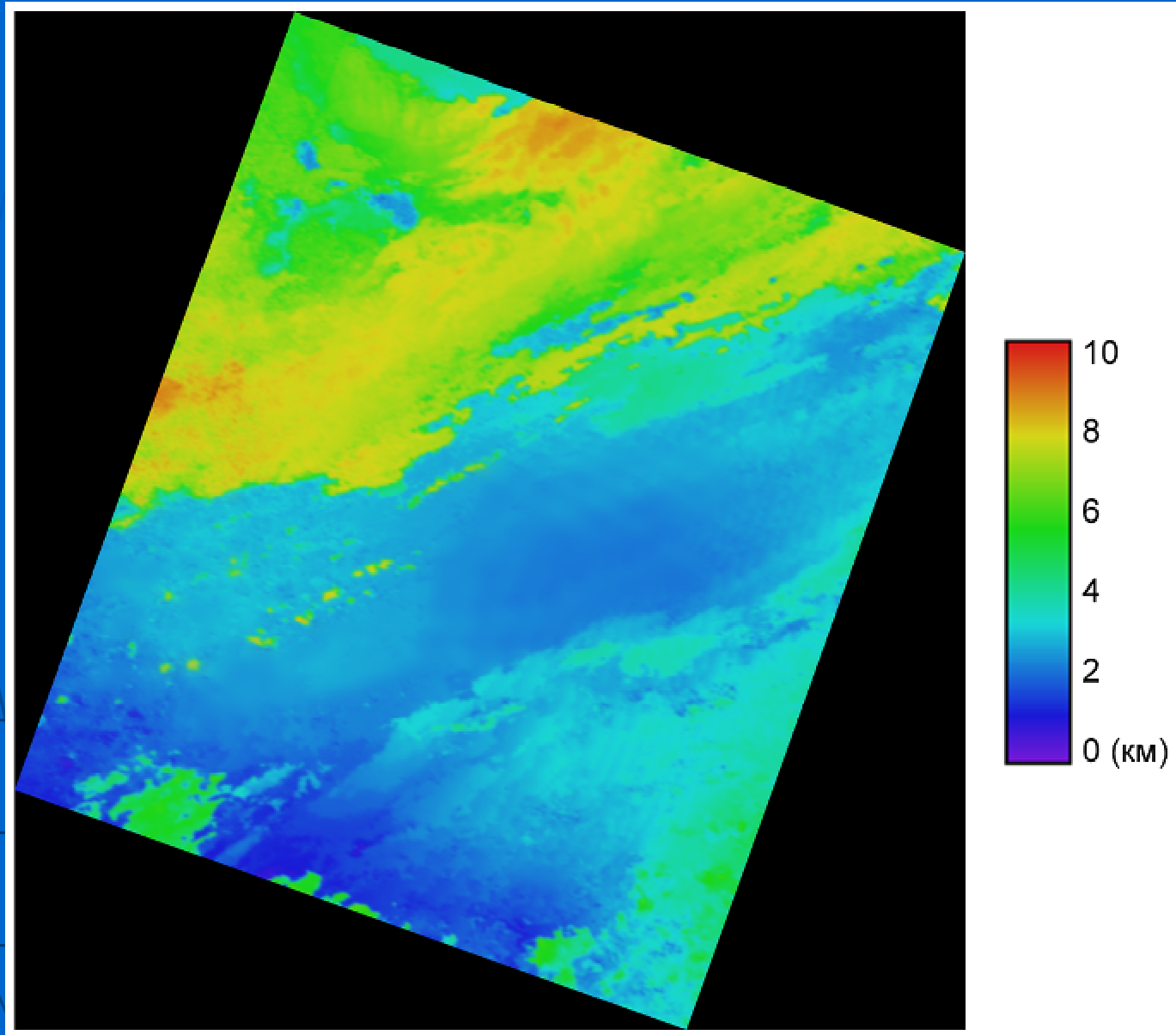
9

- Идентификация одноименных точек (карта диспарантности)

НП КА



- Формирование карты высот облачности



Направления дальнейших исследований:

- отработка алгоритмов на изображениях МСУ-50,
- исследование точностных характеристик в случае использования штатных систем ориентации КА.