



# **Результаты первичной обработки изображений МСУ-МР спутника "Метеор-М" №2-2**

**Алексанин А.И., Дьяков С.Е., Катаманов С.Н.**

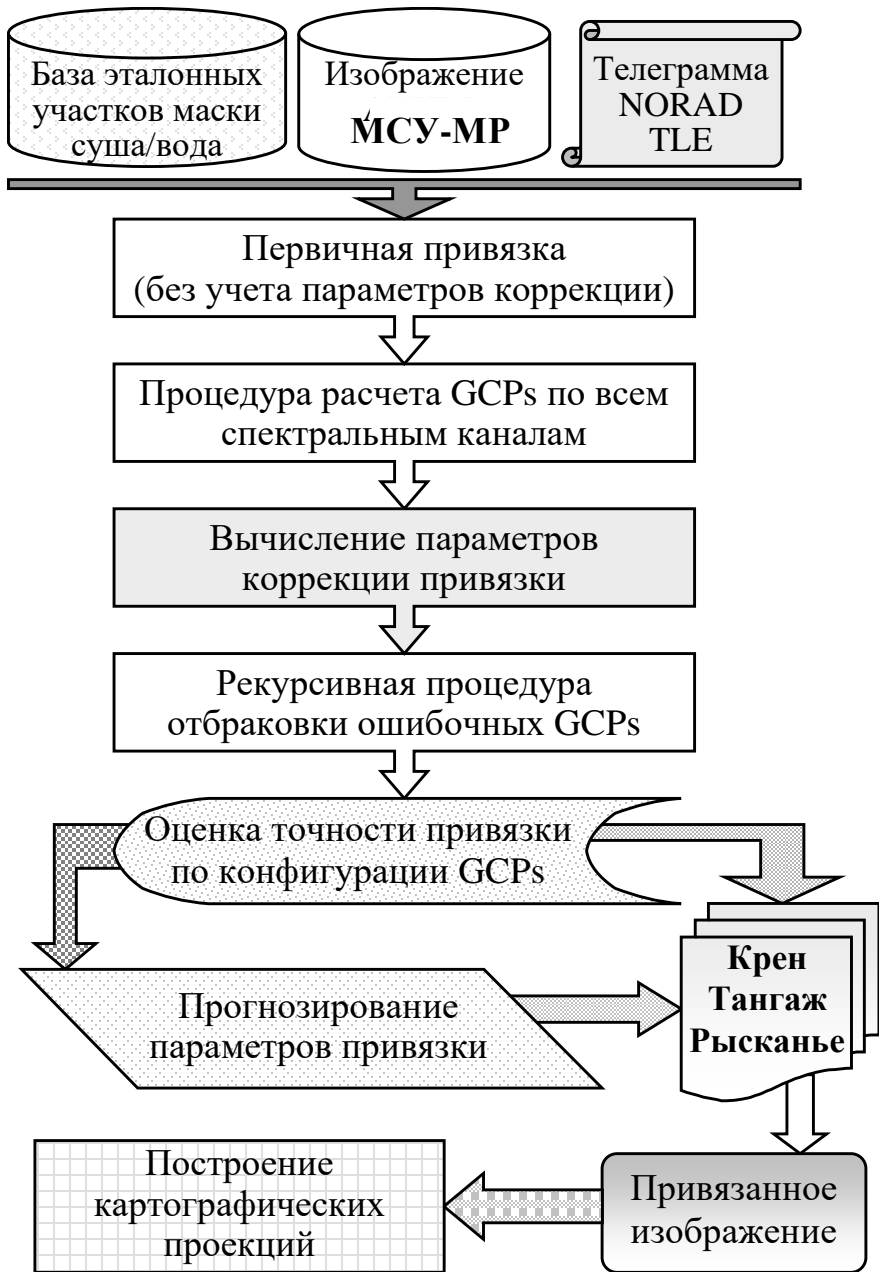
**Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН**

**E-mail: [aleks@iacp.dvo.ru](mailto:aleks@iacp.dvo.ru)**

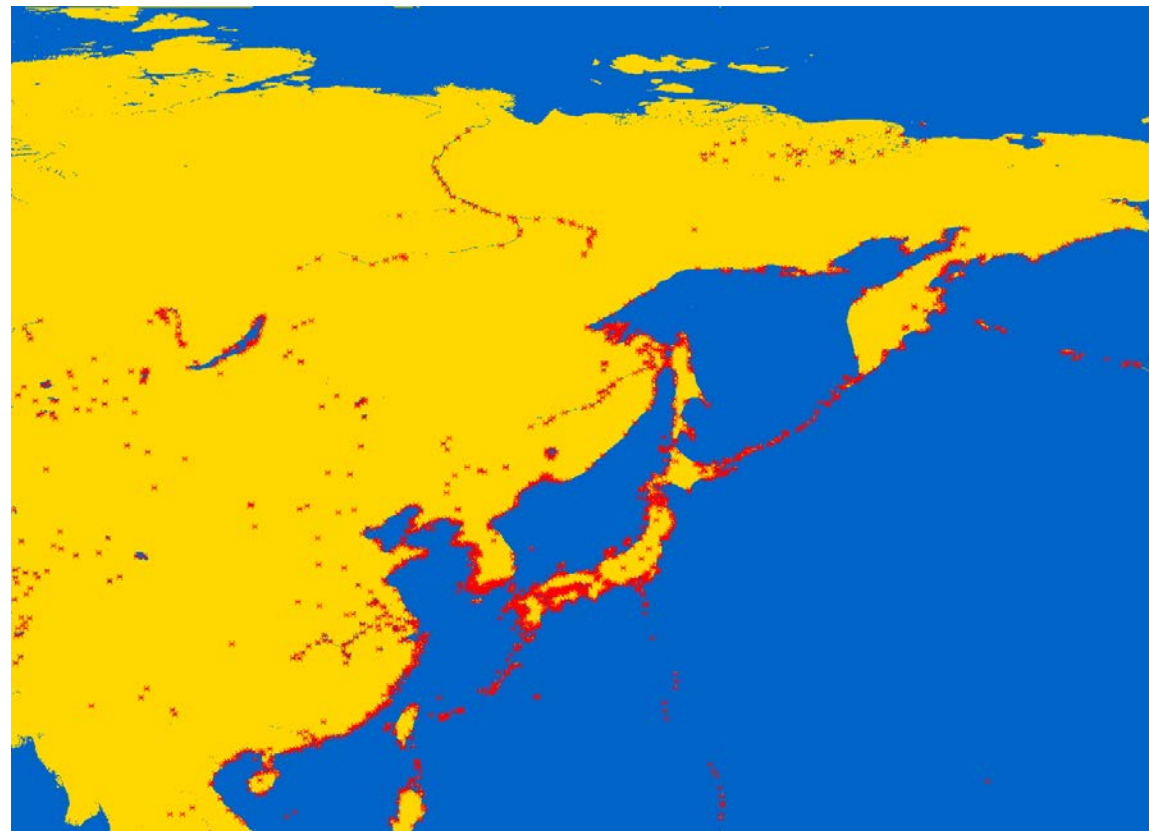
# **Процедуры первичной обработки**

- 1. Автоматическая географическая привязка изображений по реперным точкам, определяемым на изображении, на основе моделей движения спутника вокруг Земли (модели SGP4 и WGS84) и модели сканирования с определением углов ориентации в пространстве датчиков радиометра).**
- 2. Коррекция влияния криоосадков на показания ИК-датчиков – построение модели ослабления сигнала в зависимости от толщины пленки на окнах ИК-датчиков**
- 3. Калибровка ИК-каналов радиометра по технологии NOAA/NESDIS**
- 4. Построение алгоритма расчета температуры поверхности океана по технологии NLSST**

# Автоматический метод географической привязки изображений



Общая блок-схема метода



Маска суша/вода и база лэндмаркеров, созданы на основе географической базы GSHHG (ver. 2.3.4 rel. Jan. 1, 2015)

## Подход к решению задачи (модель привязки):

$$Nav = (M_S(e_O(t), t), M_I(t), M_A(t)),$$

$M_S$  - прогнозирование движения ИСЗ по орбите;

$M_I$  - формирование изображения радиометром;

$M_A$  - ориентация платформы ИСЗ в пространстве.

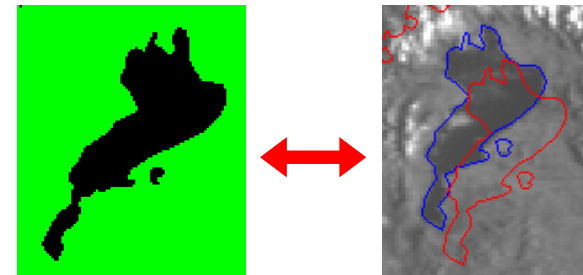
# Автоматический метод расчёта реперных точек (GCPs)

1. Вычисление ошибки привязки для лэндмаркера:

$$D(dX', dY') = \max_{dX, dY \in [-MNE, +MNE]} |Image_{land}(dX, dY) - Image_{water}(dX, dY)| \quad (1),$$

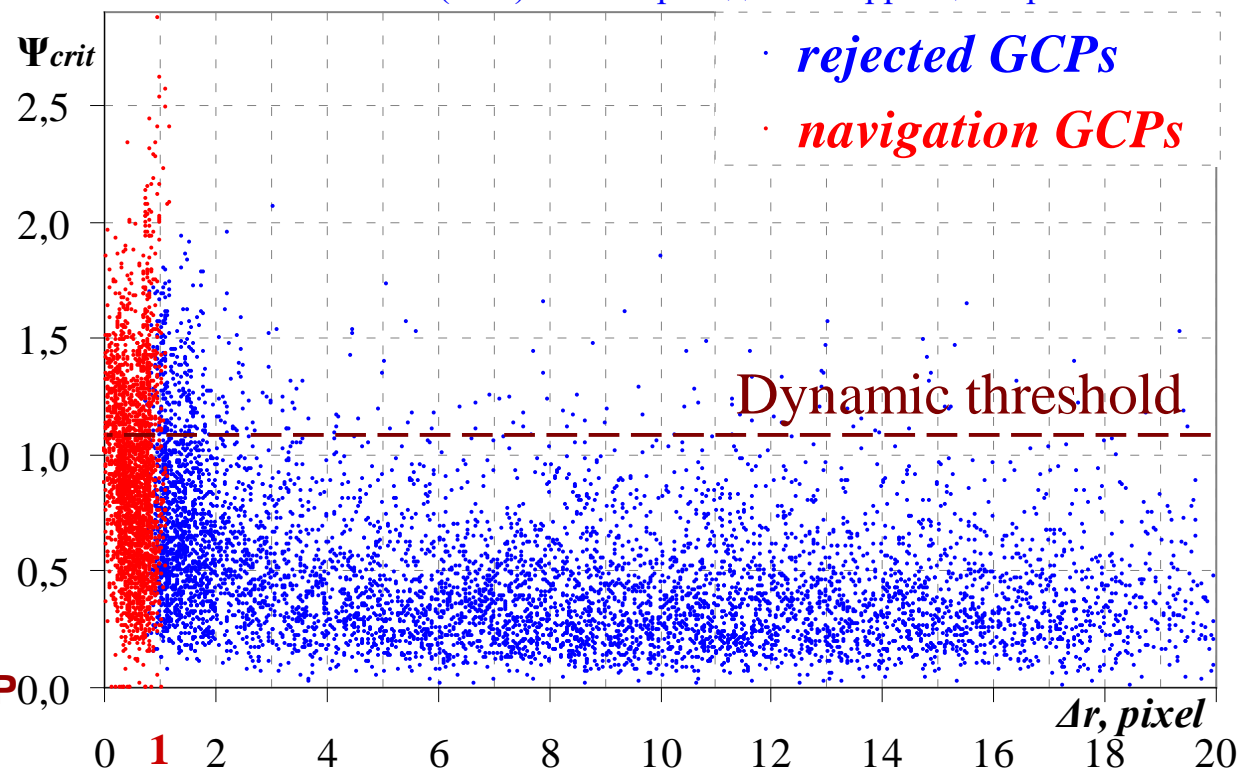
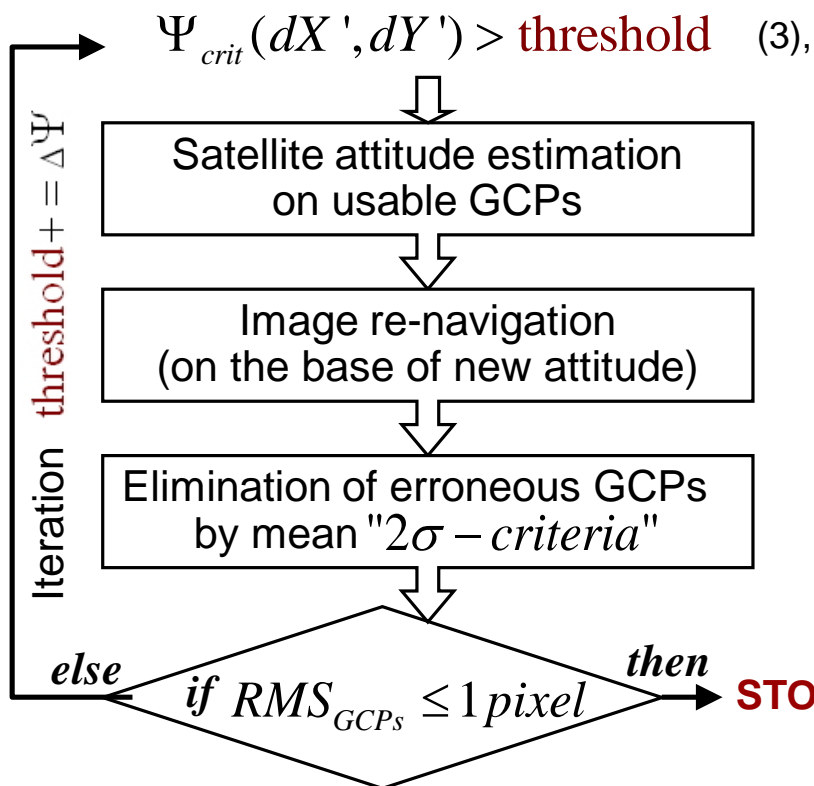
2. Проверка статистической разделимости участков суша и вода:

$$\Psi_{crit}(dX', dY') = \frac{D(dX', dY') \sqrt{n_{land} n_{water} / (n_{land} + n_{water})}}{\sqrt{((n_{land} - 1)\sigma_{land}^2 + (n_{water} - 1)\sigma_{water}^2)}} \quad (2),$$

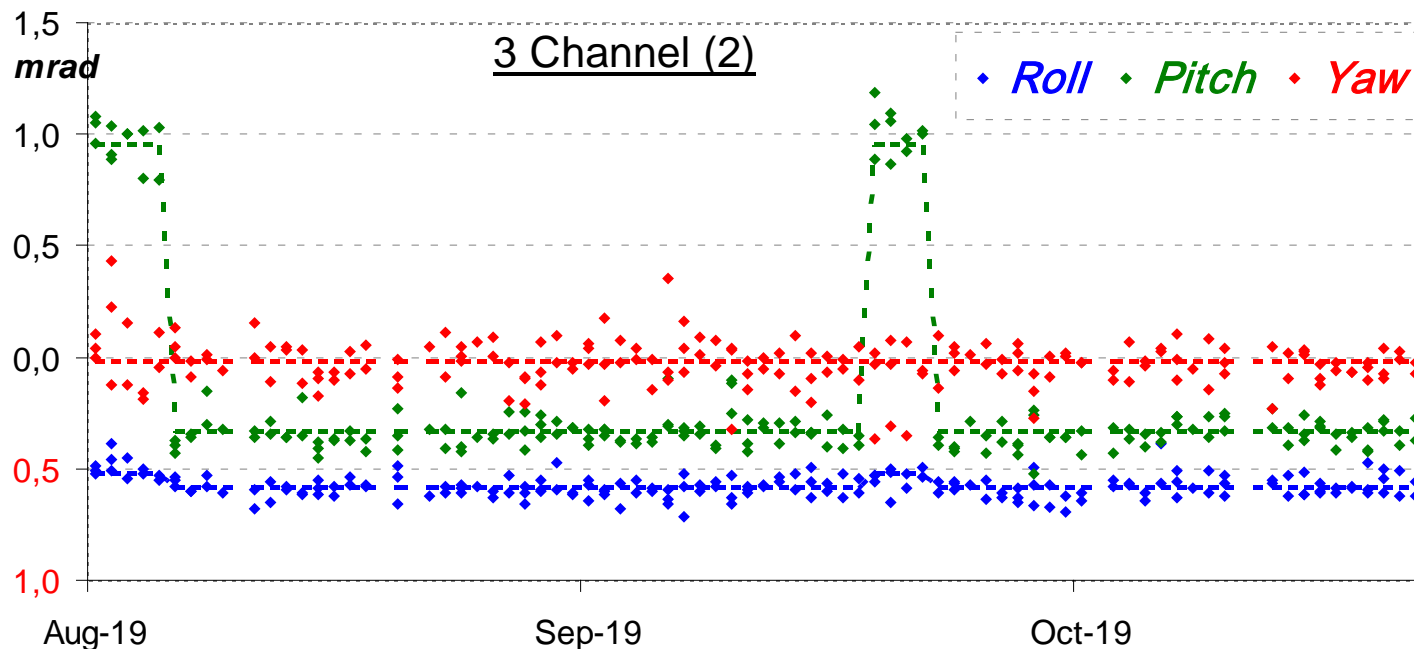
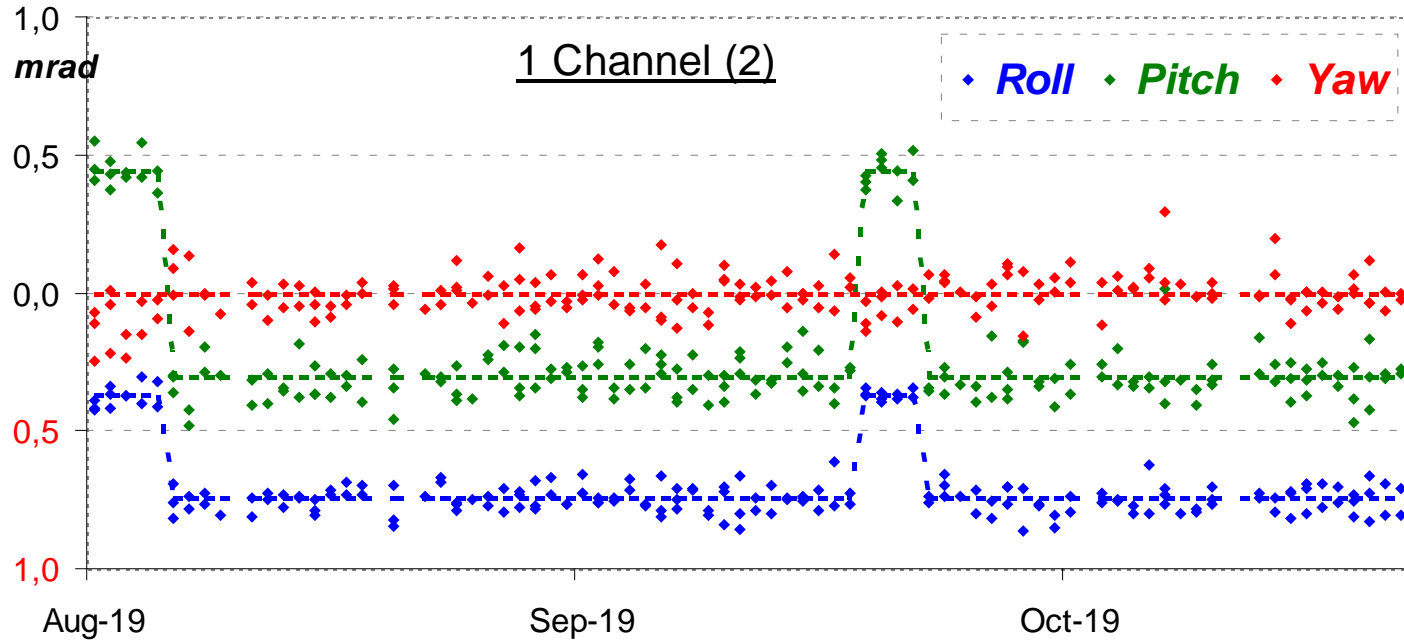


3. Отбор GCPs для коррекции привязки:

Зависимость между значением  $\Psi_{crit}$  и величиной модуля остаточных невязок в GCP ( $\Delta r$ ) после проведения коррекции привязки.



# Углы пространственного рассогласования между каналами МСУ-МР



## Подход к решению задачи:

Set of  $GCP_{channel}(dx, dy)$



$(Roll, Pitch, Yaw)$

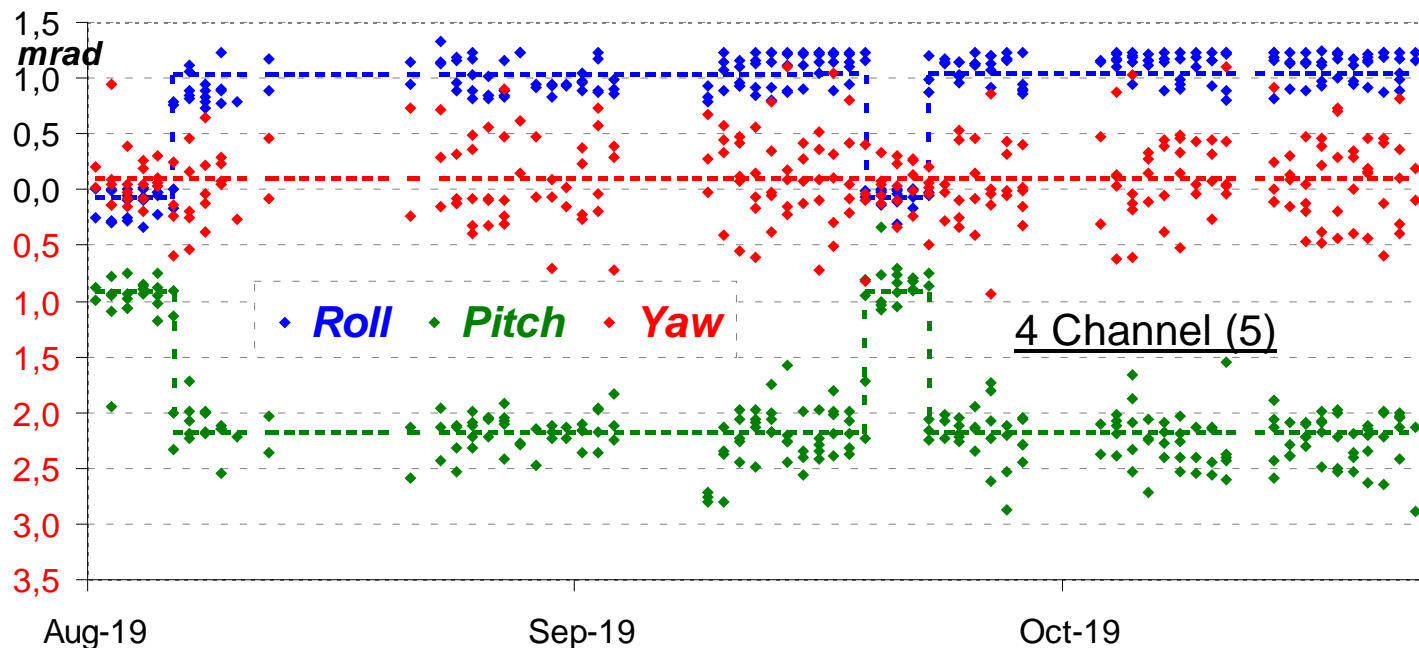
Вычисленные значения (для каждого сеанса) углов пространственного рассогласования между оптическими осями видимых каналов МСУ-МР №2–2

Здесь и далее резкий скачок

углов – смена

сканирующего комплекта

# Углы пространственного рассогласования между каналами МСУ-МР

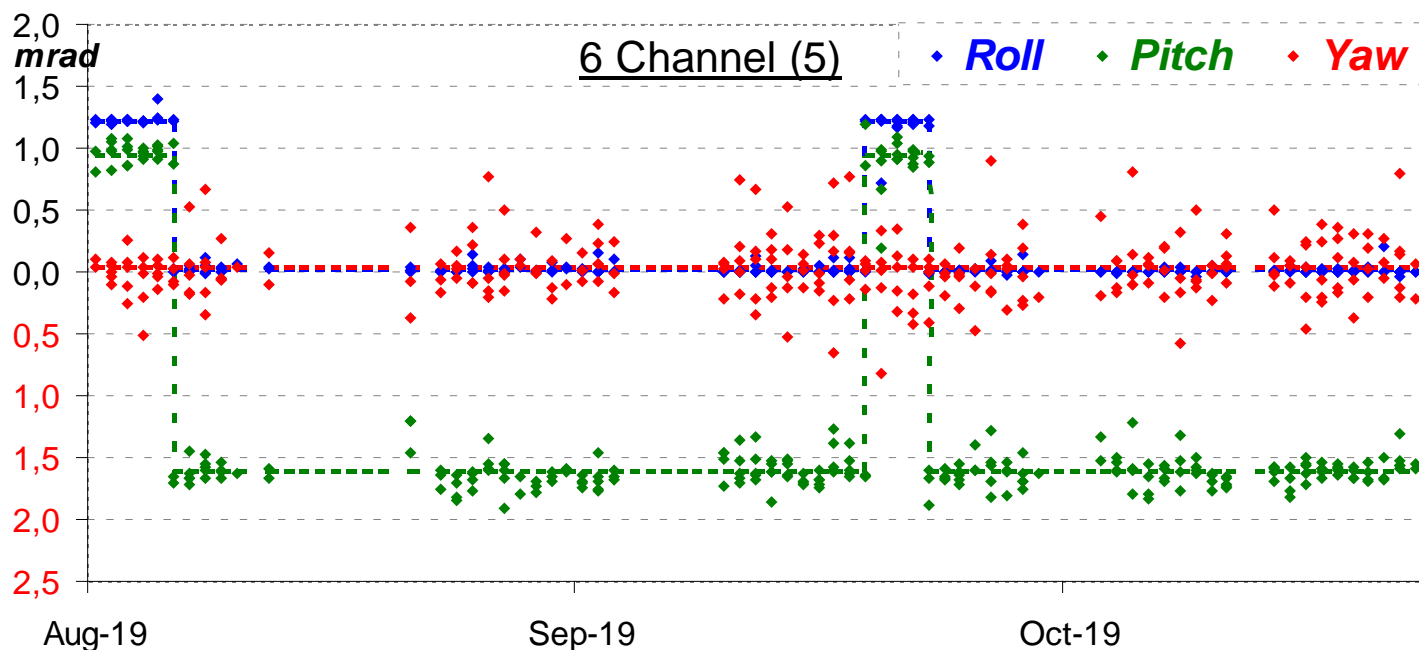


Подход к решению задачи:

*Set of  $GCP_{channel}(dx, dy)$*

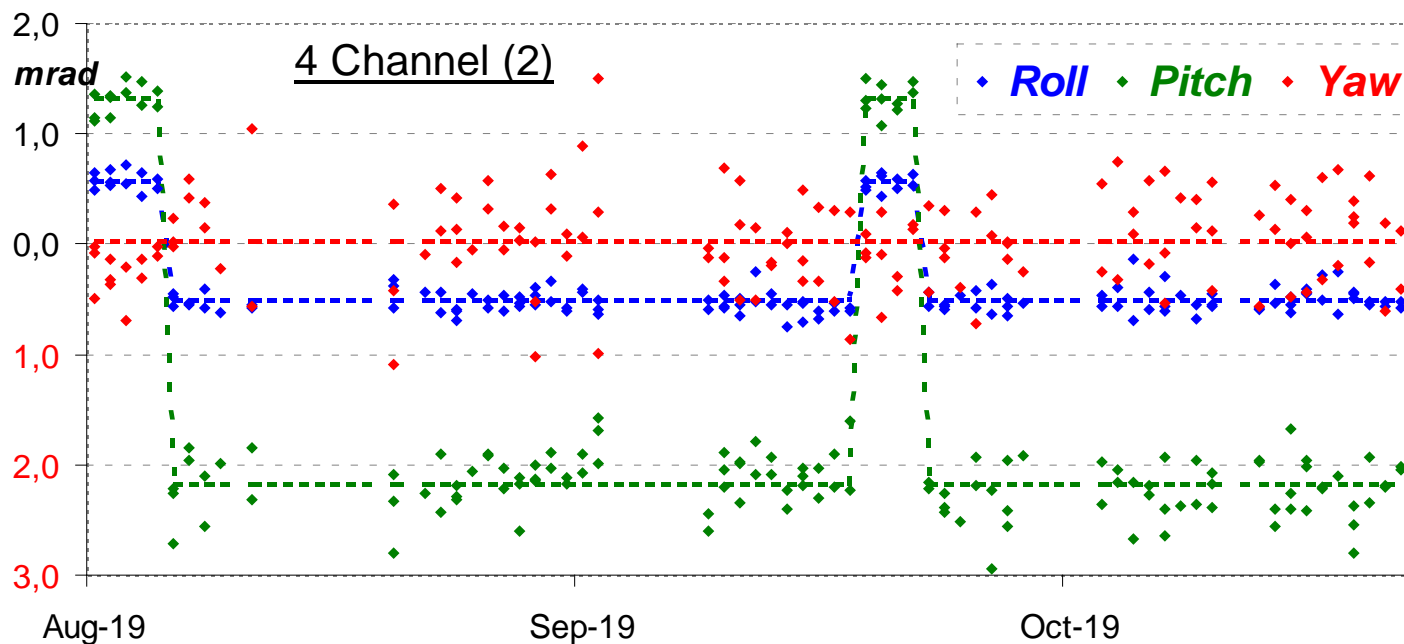


*(Roll, Pitch, Yaw)*



*Вычисленные значения (для каждого сеанса) углов пространственного рассогласования между оптическими осями ИК-каналов МСУ-МР №2–2*

# Углы пространственного рассогласования между каналами МСУ-МР

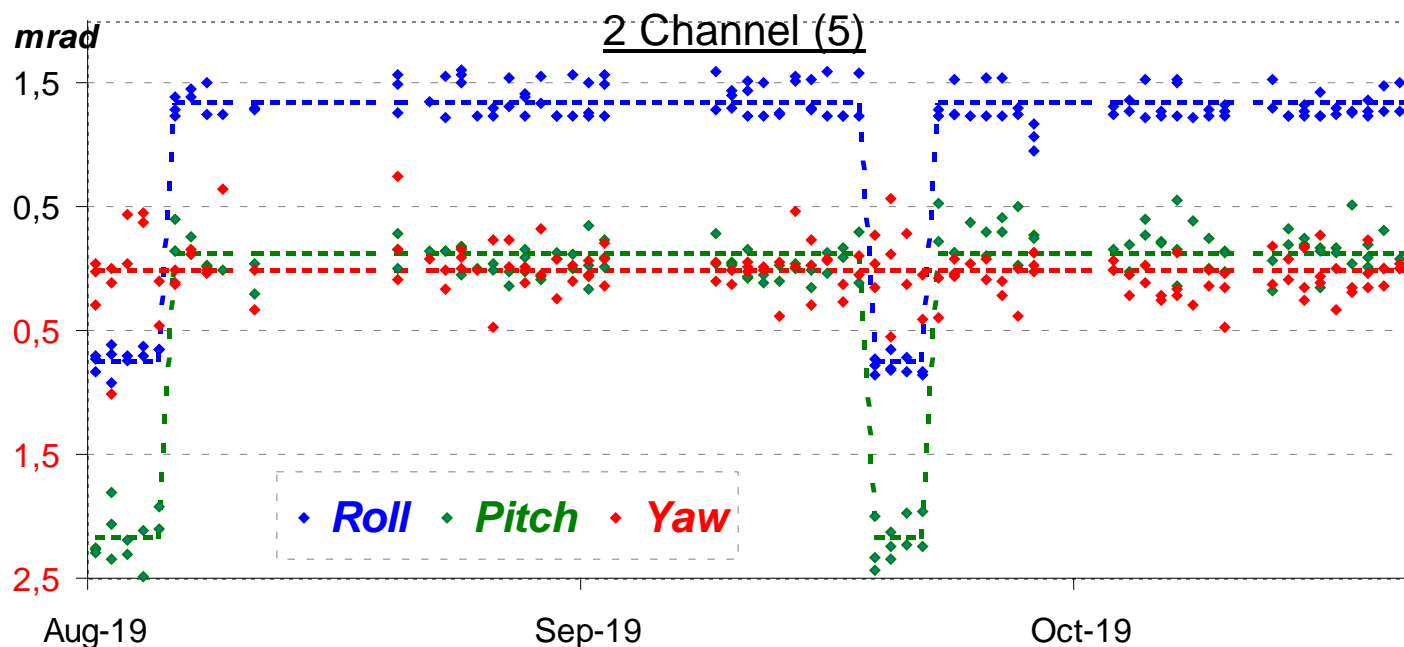


Подход к решению задачи:

*Set of GCP<sub>channel</sub> (dx, dy)*

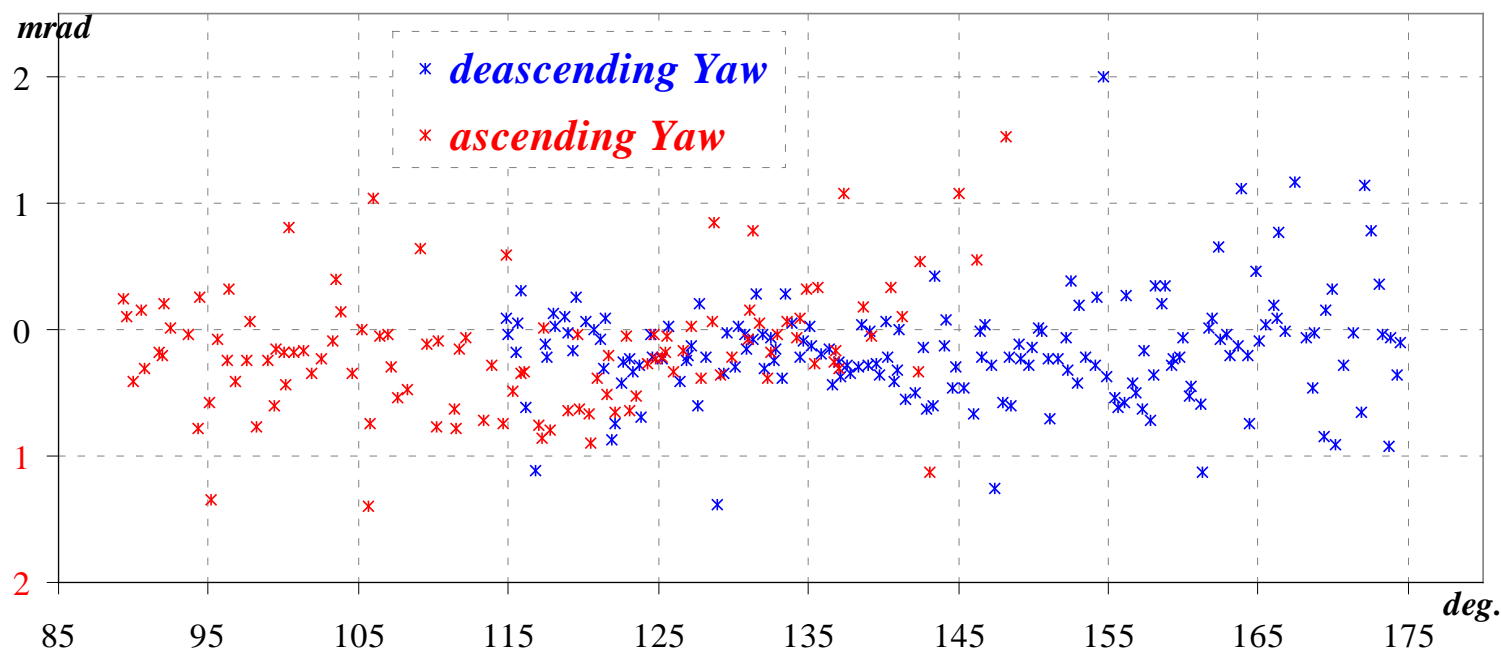
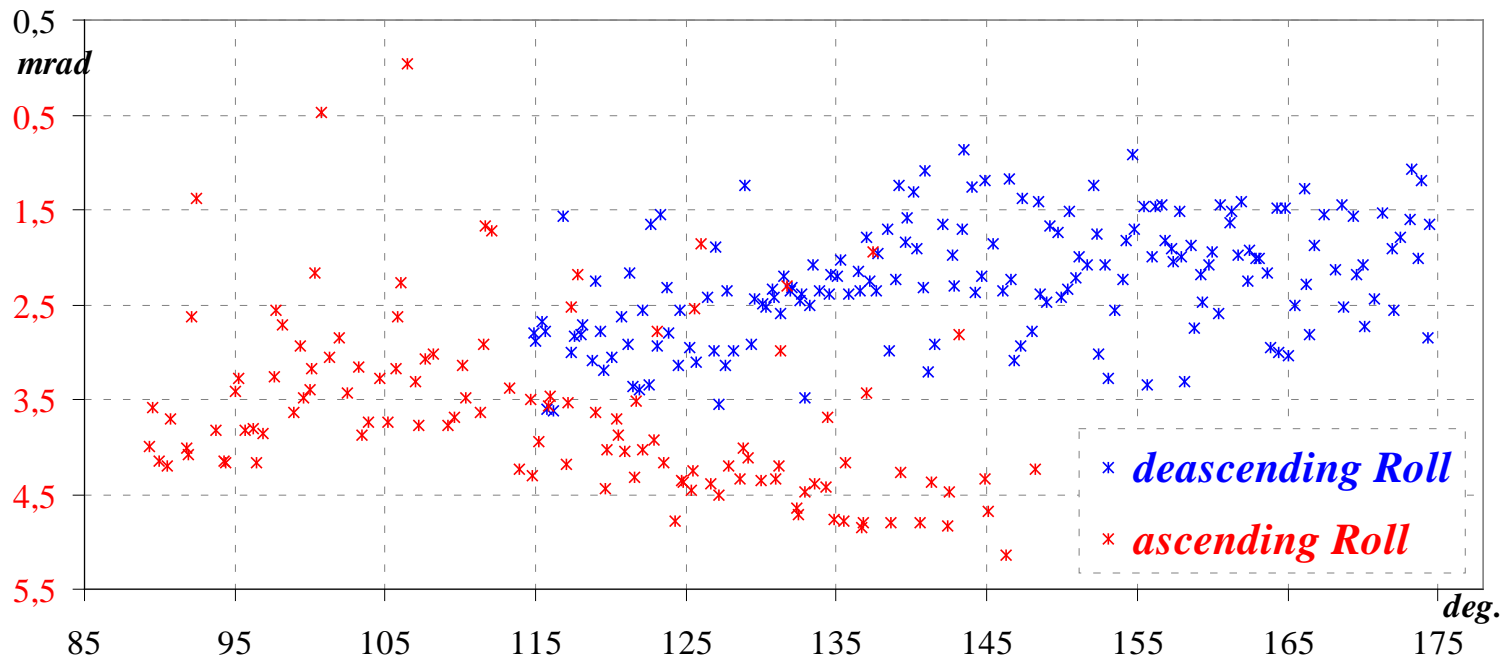


*(Roll, Pitch, Yaw)*



*Вычисленные значения (для каждого сеанса) углов пространственного рассогласования между оптическими осями видимых и ИК каналов МСУ-МР №2-2*

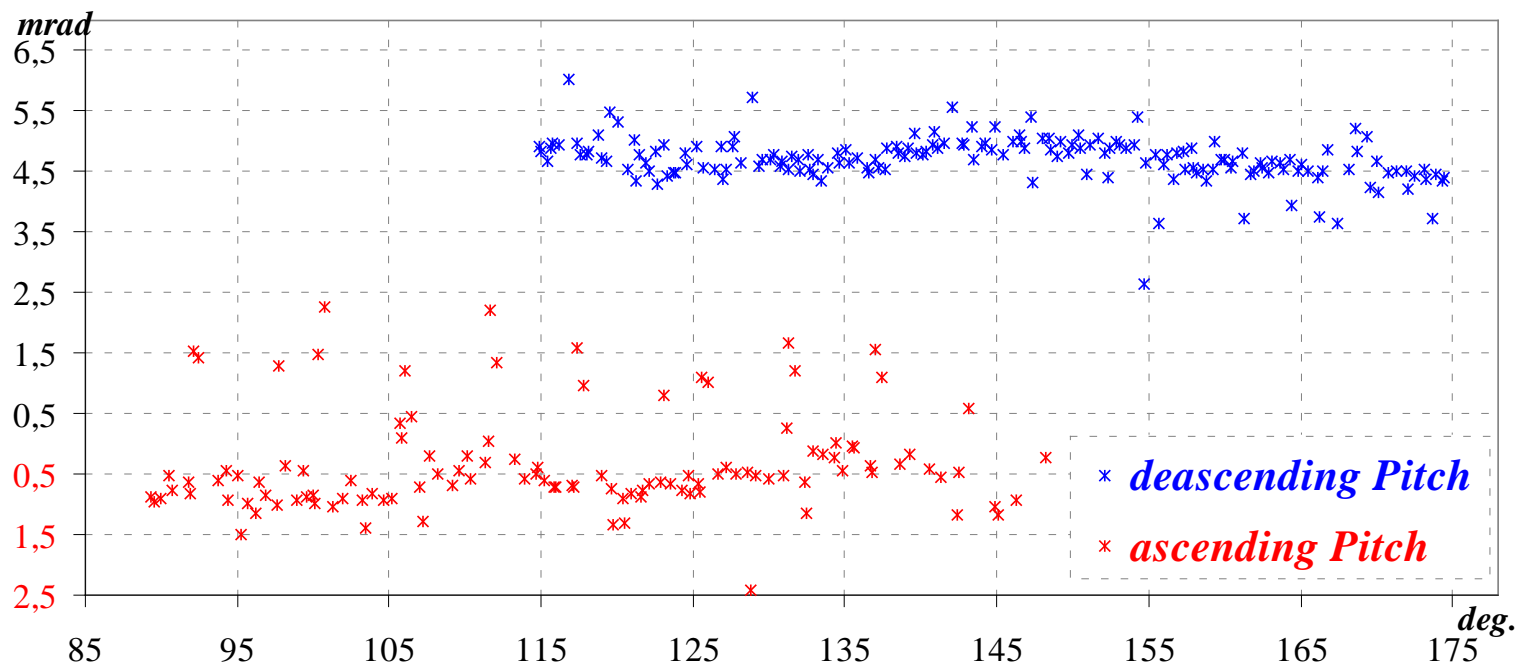
# Прогнозирование параметров коррекции привязки



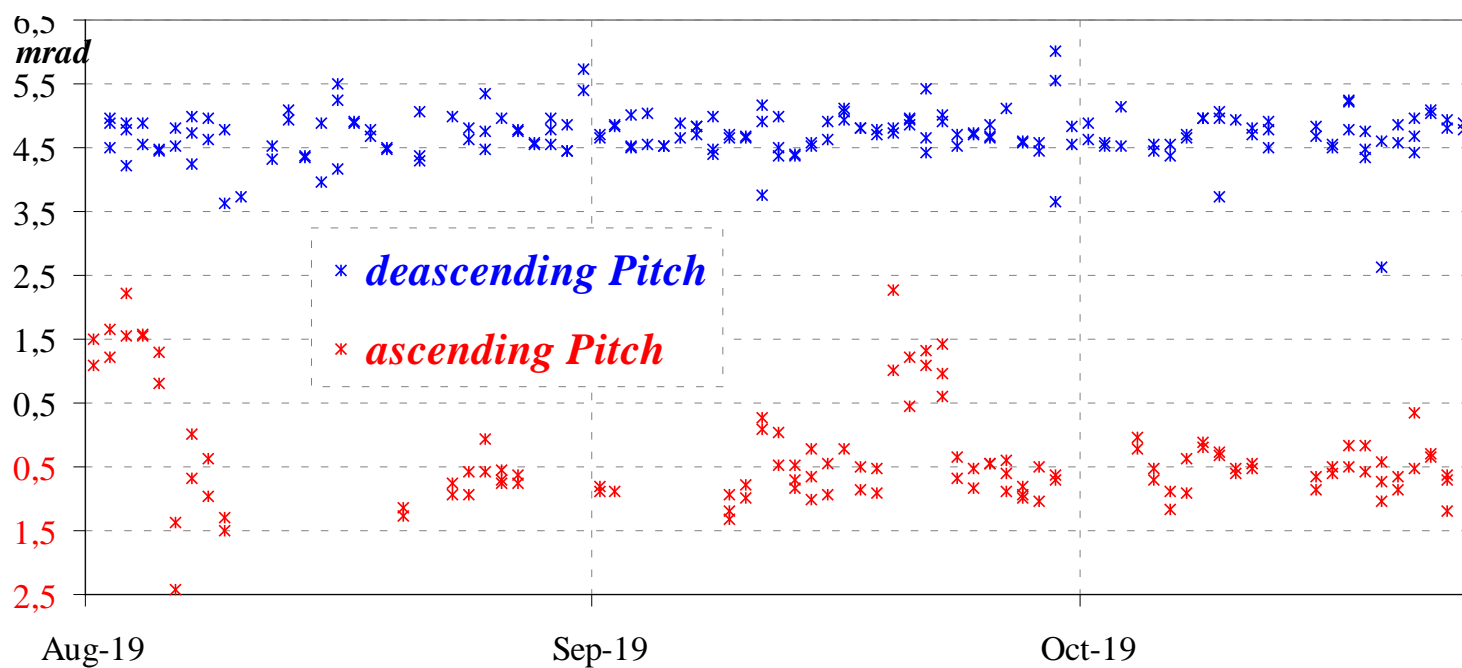
*Вычисленные по GCPs  
значения углов крен и  
рысканье положения  
платформы ИСЗ  
"Метеор-М" №2-2 в  
зависимости от  
долготы ближайших  
узлов витков орбиты*



# Прогнозирование параметров коррекции привязки



*Вычисленные по GCPs  
значения угла тангажа  
положения платформы  
ИСЗ "Метеор-М" №2-2  
в зависимости от  
долготы ближайших  
узлов витков орбиты и  
времени формирования  
изображения*



## **Результаты и выводы**

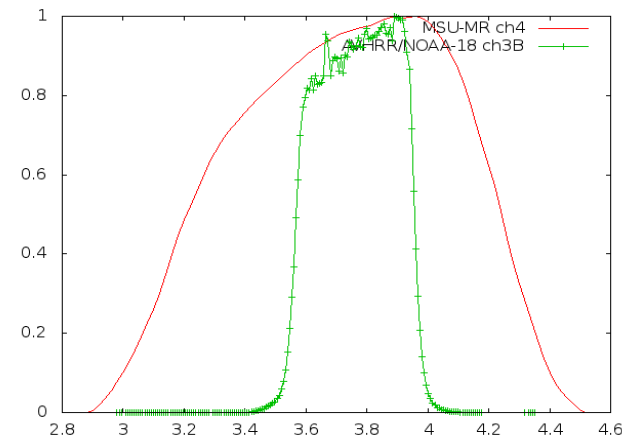
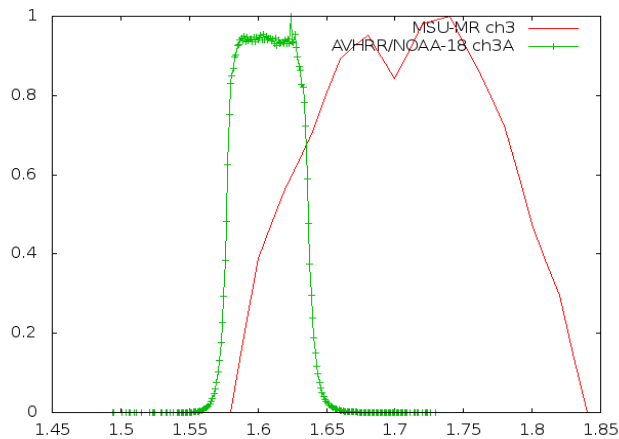
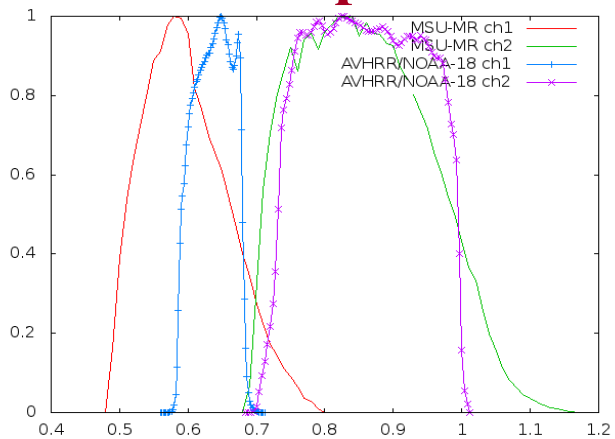
- ✓ **Созданная в РСЦМОС ДВО РАН технология географической привязки изображений МСУ-МР, получаемых с ИСЗ «Метеор-М» №2 и №2-2, позволяет полностью в автоматическом режиме привязывать каждое изображение полного сеанса приёма с пиксельной точностью. Привязка выполняется без использования целевых данных (модель SGP4 с телеграммами NORAD TLE) по рассчитанным реперным точкам или прогнозированием.**
- ✓ **Разработан метод, с помощью которого по рассчитанным реперным точкам для отдельных каналов радиометра/камеры можно уточнять геометрические характеристики приборов и определять параметры пространственного рассогласования между оптическими осями отдельных каналов. Оценки, вычисленные данным методом, позволяют проводить межканальную привязку данных с пиксельной точностью и совместно использовать для коррекции привязки рассчитанные наборы реперных точек по изображениям разных каналов.**
- ✓ **Разработана методика прогнозирования привязки изображений, получаемых с ИСЗ «Метеор-М» №2 и №2-2, которая основана на переносе вычисленных значений одного или нескольких углов по реперным точкам на изображениях, которые были сформированы на близлежащих витках орбиты (с одинаковым направлением).**

# Калибровка

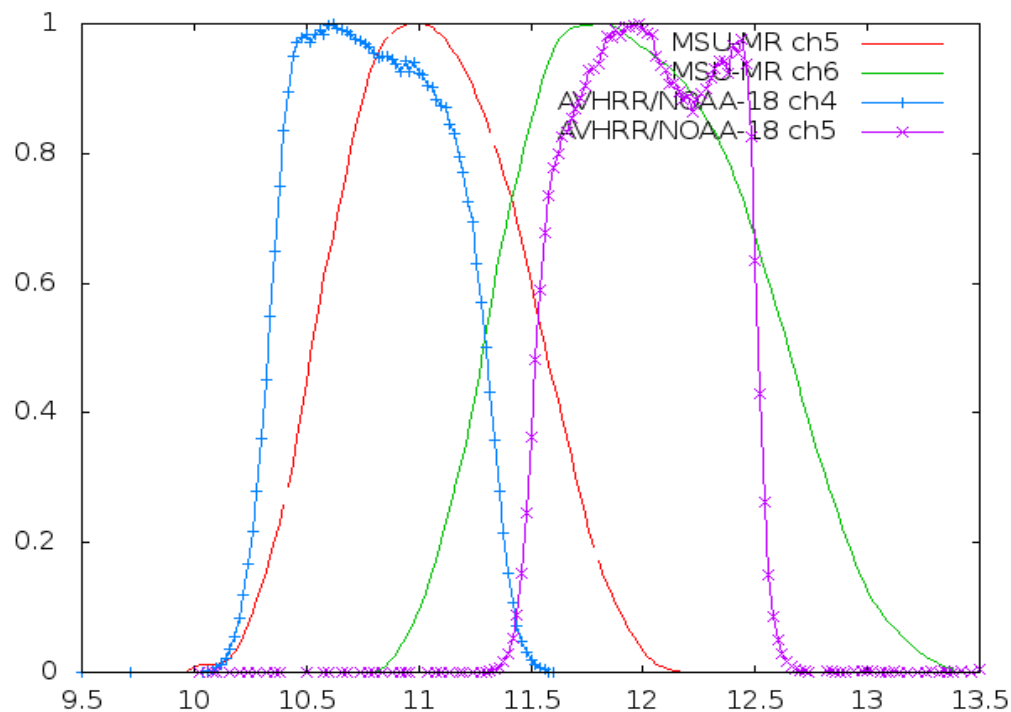
**Особенности прибора:**

- 1. Наличие криоосадков на ИК-датчики радиометра МСУ-МР искажает сигнал. Слой криоосадков на стеклах датчиков непрерывно нарастает. Прогревом криоосадки испаряют, но они снова оседают.**
- 2. Спектральные функции отклика (функции спектральной чувствительности) датчиков отличаются от аналогичных для NOAA.**
- 3. Наблюдается шум случайного характера. Требуется построить карты ТПО с  $RMS < 0,7-0,8C$  и  $bais < 1/8C$ .**

# Спектральные функции отклика МСУ-МР и NOAA



№		назначение
1	0,5-0,7 мкм	обнаружение облачности и суши
2	0,7-1,1 мкм	классификация суша/море
3	1,6-1,8 мкм	аэрозоль, выделение снега и льда
4	3,5-4,1 мкм	фильтрация облачности ночью, ТПО
5	10,5-11,5 мкм	фильтрация облачности ночью, ТПО
6	11,5-12,5 мкм	ТПО



Графики функций отклика каналов 1-6.

## Аппроксимация функции Планка радиометра МСУ-МР

$$R_{\text{plank}}(\tilde{\nu}, T) = c_1 \tilde{\nu} / e^{\frac{c_2 \tilde{\nu}^3}{T} + 1}$$

$$R_{\text{klm}}(T, \tilde{\nu}, \tilde{A}, \tilde{B}) = R_{\text{plank}}(\tilde{\nu}, T \times \tilde{A} + \tilde{B})$$

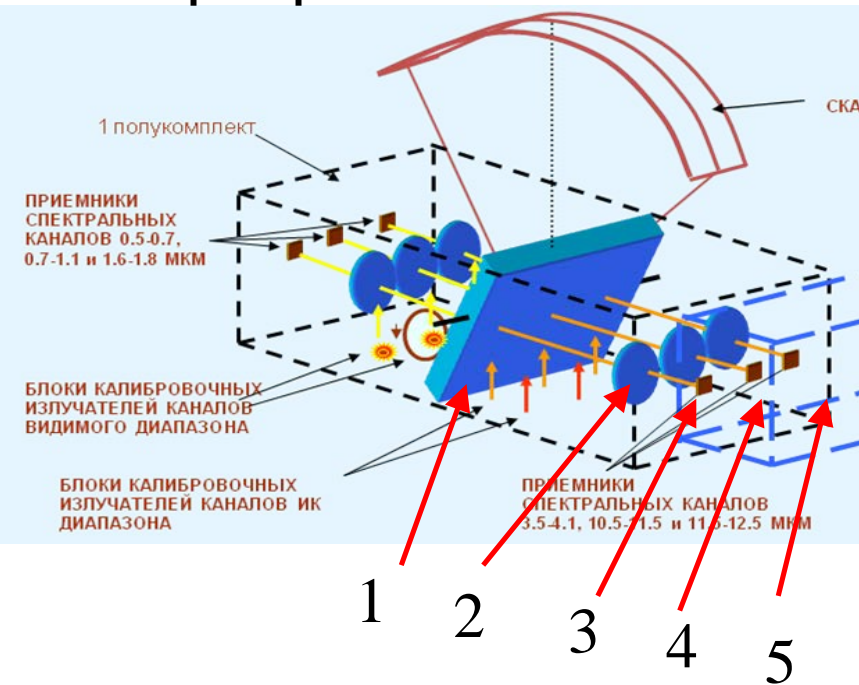
$$R_{\text{MSU-MR}} = \frac{\int_{\lambda=0. \text{мкм}}^{20. \text{мкм}} R_{\text{plank}}(\nu(\lambda), T) \text{NFR}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda=0. \text{мкм}}^{20. \text{мкм}} \text{NFR}(\lambda) d\lambda}$$

$$\min_{\tilde{\nu}, \tilde{A}, \tilde{B}} \sum_{T=-40C}^{40C} \left( R_{\text{MSU-MR}}(T) - R_{\text{klm}}(T, \tilde{\nu}, \tilde{A}, \tilde{B}) \right)^2$$

№		Центральное волновое число	A	B
4	3,5-4,1 мкм	3.77 мкм	0.9663	10.03
5	10,5- 11,5 мкм	10.661 мкм	0.9901	6.18
6	11,5- 12,5 мкм	11.92 мкм	0.9978	0.63

# Общая схема калибровки ИК-каналов радиометров

## Схема прибора МСУ-МР



### Источники ошибок:

1. Зеркало
2. Фильтр
3. Тепловой шум датчиков
4. Наводки и передача ан. инф. к АЦП
5. АЦП

### Процедуры калибровки ИК-каналов AVHRR:

1. NOAA NESS 107 Tech. memorandum,
2. NOAA POD User's Guide
3. NOAA KLM User's Guide

$$R_{\text{plank}}(T) = c_1 \tilde{\nu} / e^{\frac{c_2 \tilde{\nu}^3}{T} + 1}$$

$$R_{\text{klm}}(T) = R_{\text{plank}}(T \times \tilde{A} + \tilde{B})$$

$$T_{\text{cool}} = a_0^{\text{cool}} + a_1^{\text{cool}} C_{\text{tlim cool}} \quad T_{\text{hot}} = a_0^{\text{hot}} + a_1^{\text{hot}} C_{\text{tlim cool}}$$

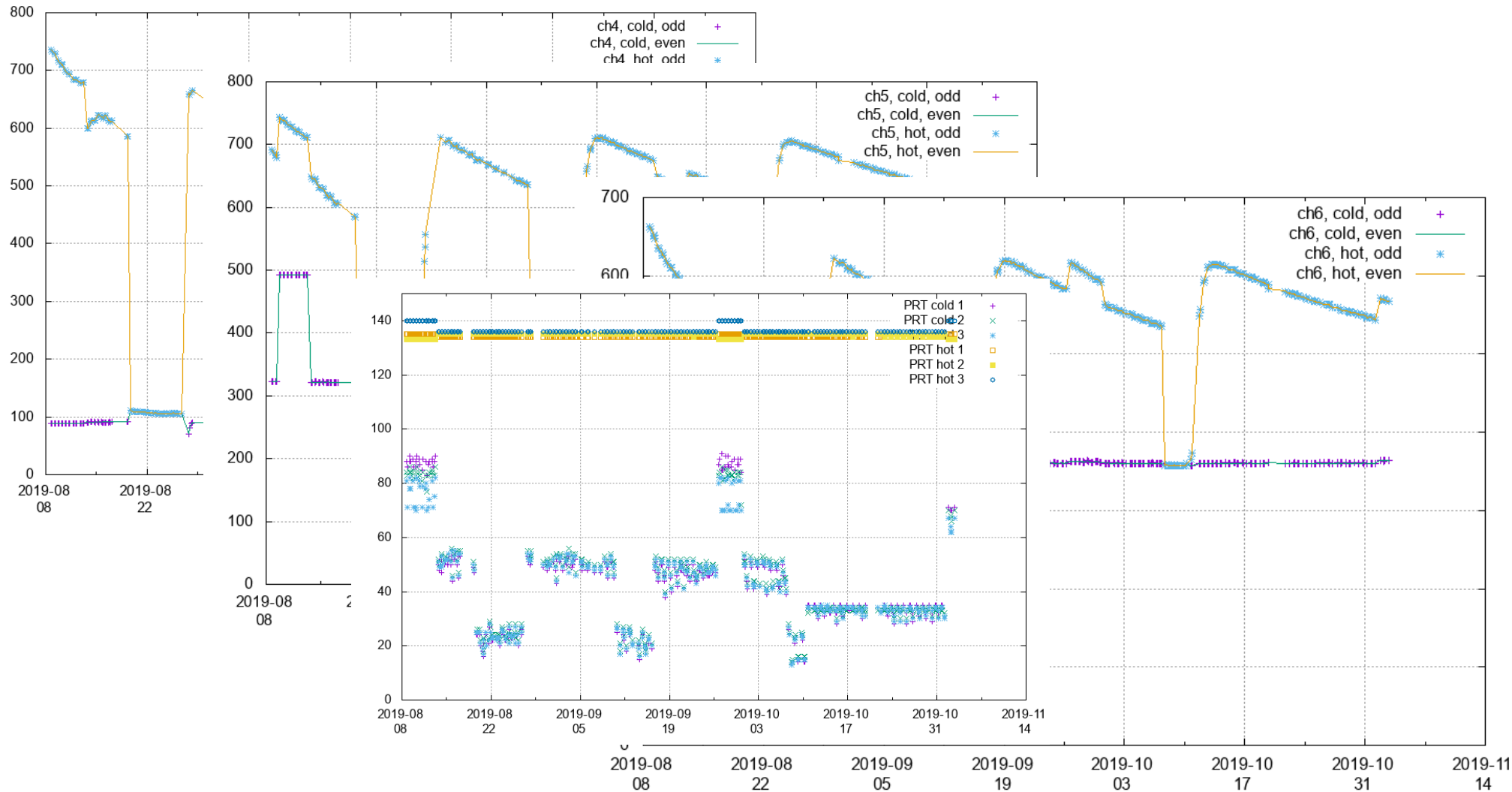
$$\left[ \begin{array}{l} C_{\text{cool}} \rightarrow R_{\text{cool}} = R_{\text{klm}}(T_{\text{cool}}) \\ C_{\text{hot}} \rightarrow R_{\text{hot}} = R_{\text{klm}}(T_{\text{hot}}) \end{array} \right] \rightarrow (M, I)$$

$$R(C) = M C + I$$

$$R_{\text{nline}}(C) = \frac{(R - R_{\text{cool}})(R_{\text{hot}} - R)}{((R_{\text{hot}} + R_{\text{cool}})/2)^2} \Delta R$$

$$T(C) = R_{\text{klm}}^{-1}(R(C) + R_{\text{nline}}(C))$$

# Калибровка данных радиометра МСУ-МР по бортовым измерениям



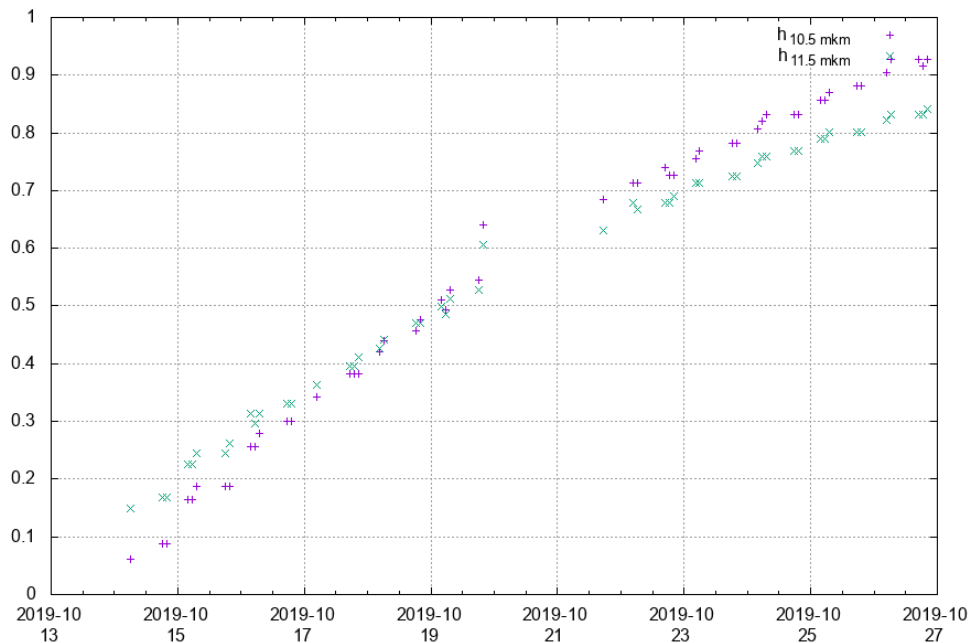
**Изменчивость во времени показаний радиометра на бортовых мишенях для ИК-каналов: №4-слеваС; №5-центр, №6 - справа; отсчеты датчиков температуры - посередине внизу. Судя по изменчивости показаний термометров холодного тела идет наладка равномерности прогрева.**

## Модель ослабления сигнала криоосадками

$$I_{hot} = a_0 + a_1 R_{hot} e^{-h} + C,$$

$$I_{cool} = a_0 + a_1 R_{cool} e^{-h} + C$$

**I** – отсчеты радиометра на мишенях, **h** – показатель ослабления сигнала, пропорциональный толщине слоя криоосадков

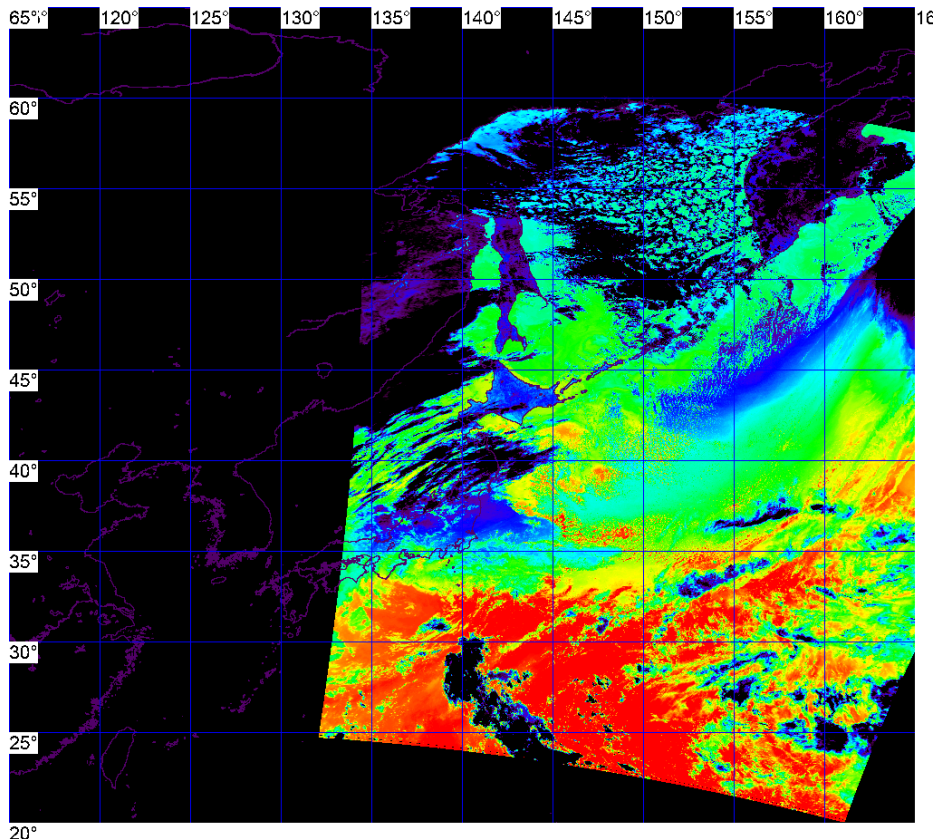


**Зависимость показателей ослабления от времени для каналов 5 и 6**



# Сравнение карт радиационных температур

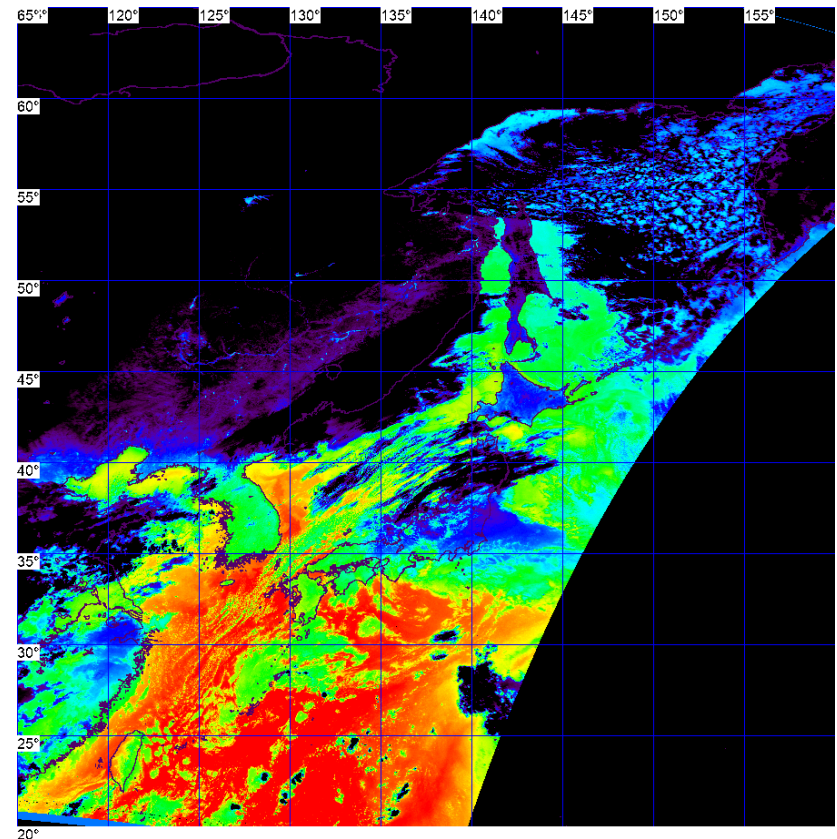
Основная проблема калибровки и построения алгоритма расчета карт температуры – непостоянство отсчетов термометров на холодном теле. По-видимому не удастся организовать равномерность прогрева. Если это не удастся, то при калибровке нужно температуру тела определять индивидуально для каждого ИК-датчика



**NOAA19. 2019-10-13 19:32:57**

**10.5 mkm**

Подбор температуры тел на конец октября. Разница радиационных температур – в пределах 1 градуса, что может объясняться различием в функциях СФЧ.



**METEOR-M2 -2. 2019-10-13 18:35:40**

**10.5 mkm**

## **Заключение**

- 1. Углы ориентации спутника стабильны по времени и легко прогнозируются.**
- 2. Межканальные рассогласования ориентаций изображений небольшие и не превосходят 3-х миллирадиан (3-х пикселей).**
- 3. Шумы на некоторых каналах есть, но небольшие 2-3 отсчета в среднем.**
- 4. Радиометр МСУ-МР спутника Метеор-М №2-2 по качеству данных превосходит аналогичный радиометр спутника Метеор-М №2 и позволит провести калибровку и расчет ТПО в соответствии с мировым стандартом качества.**
- 5. Радиометр можно откалибровать как только закончатся эксперименты с изменением температуры холодного тела.**



**МСУ-МР, Метеор-М 2-2  
RGB за 15.09.2019**