



Калибровка ИК-каналов радиометра МСУ-МР спутника Метеор-М №2-2 и построение карт ТПО

Алексанин А.И., Дьяков С.Е.

Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН

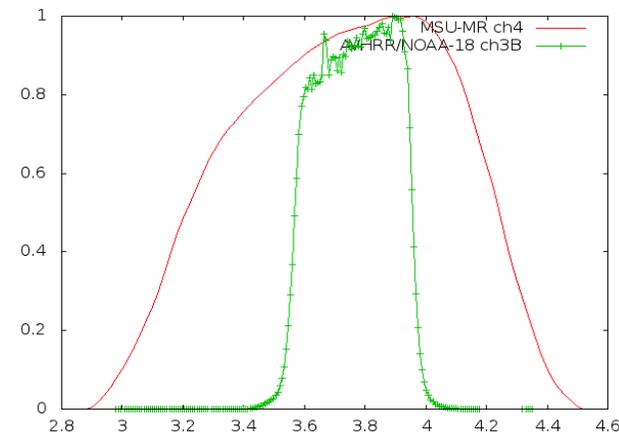
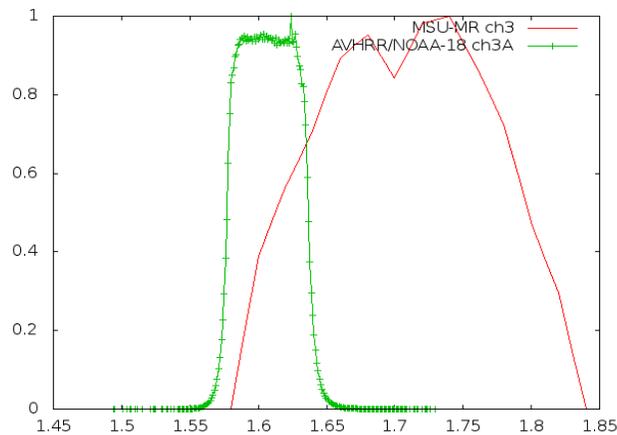
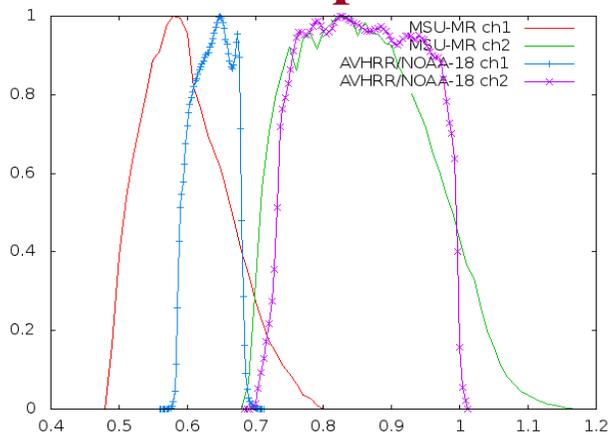
E-mail: aleks@iacp.dvo.ru

Калибровка

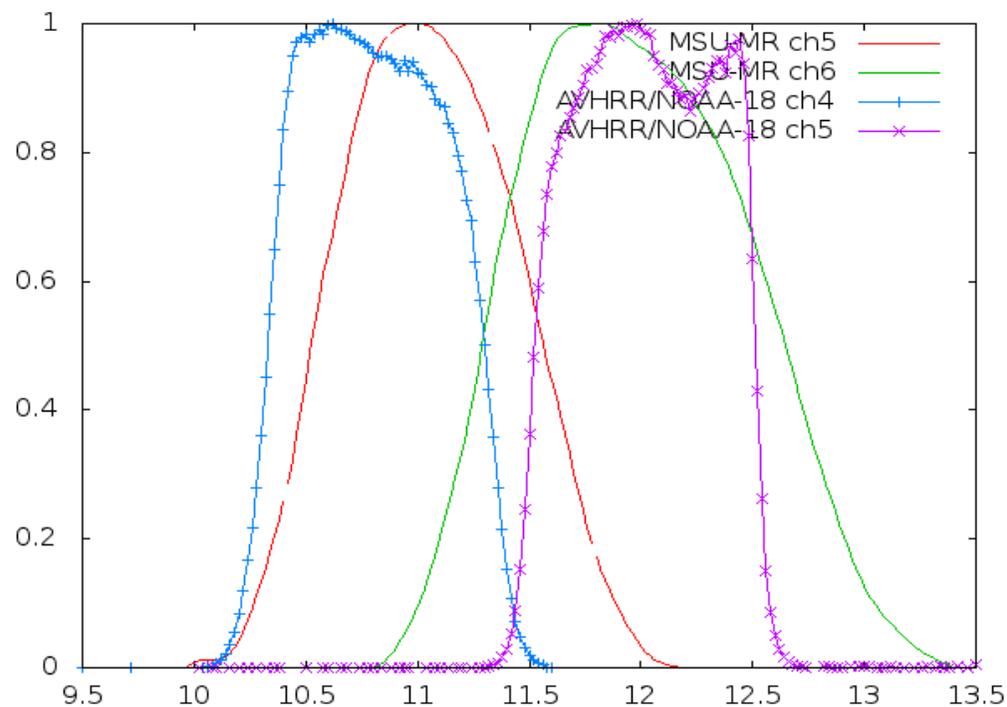
Особенности прибора:

- 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 других спутников.**
- 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

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

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

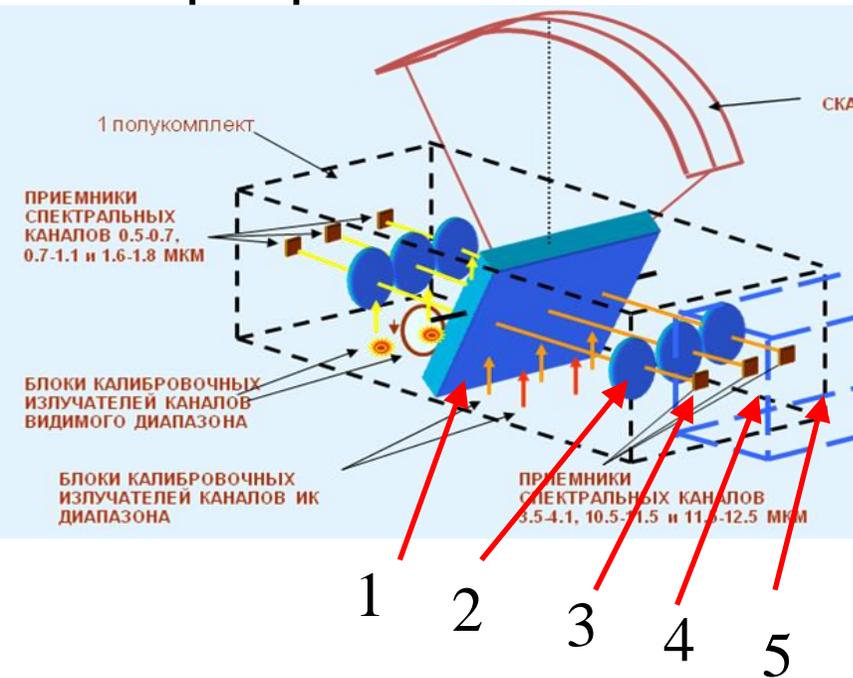
$$R_{\text{MSU-MR}} = \frac{\int_{\lambda=0.0001}^{20.0001} R_{\text{plank}}(\nu(\lambda), T) NFR(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda=0.0001}^{20.0001} NFR(\lambda) d\lambda}$$

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

№		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



Возможные 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

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

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

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

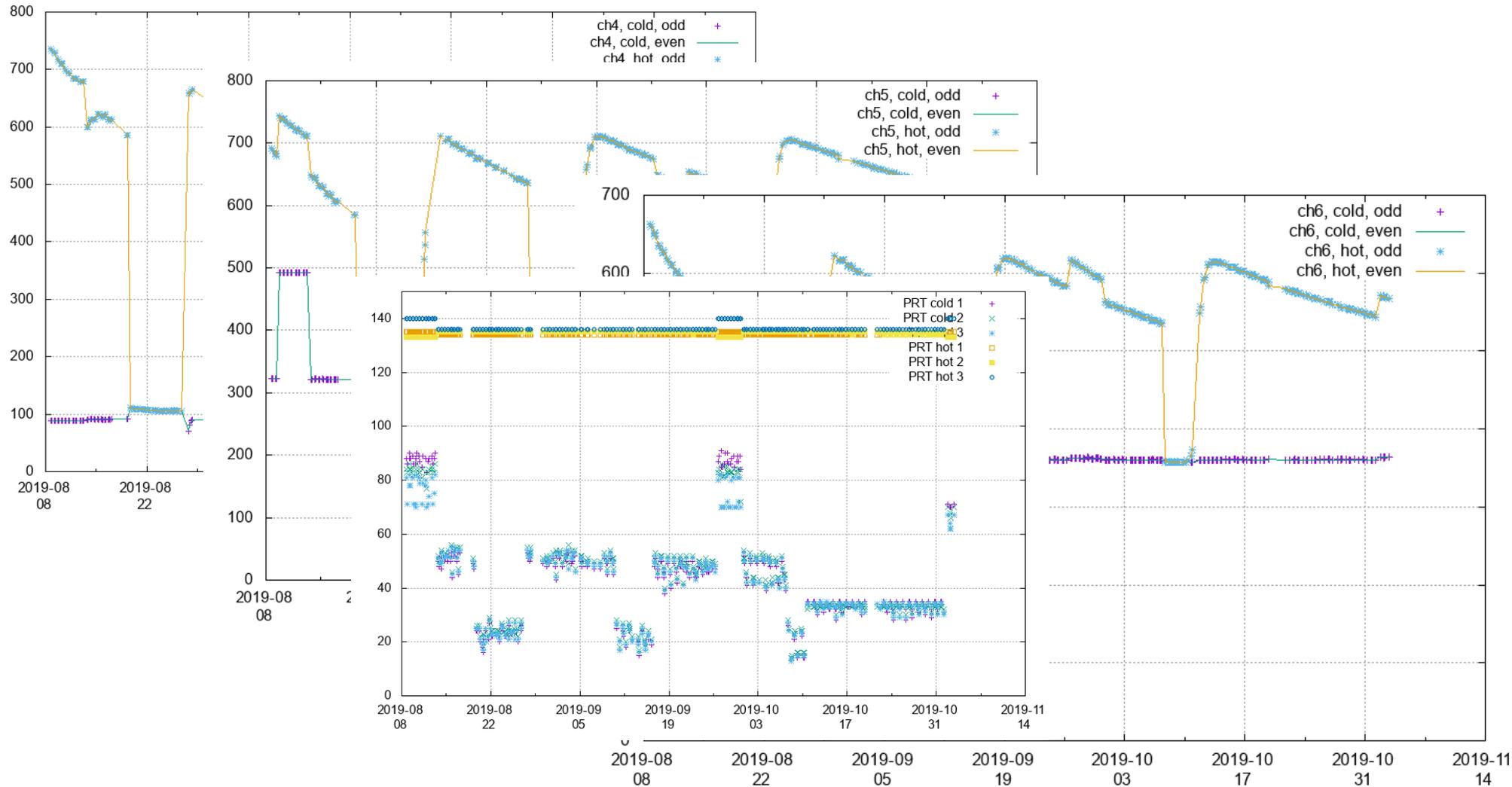
$$\left[\begin{array}{l} C_{\text{cool}} \rightarrow R_{\text{cool}} = R_{\text{klm}}(T_{\text{cool}}) \\ C_{\text{hot}} \rightarrow R_{\text{hot}} = R_{\text{klm}}(T_{\text{hot}}) \end{array} \right] \rightarrow (M, I)$$

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

$$R_{\text{nlm}}(C) = \frac{(R - R_{\text{cool}})(R_{\text{hot}} - R)}{\left(\frac{(R_{\text{hot}} + R_{\text{cool}})}{2}\right)^2} \Delta R$$

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

Калибровка данных радиометра МСУ-МР по бортовым измерениям



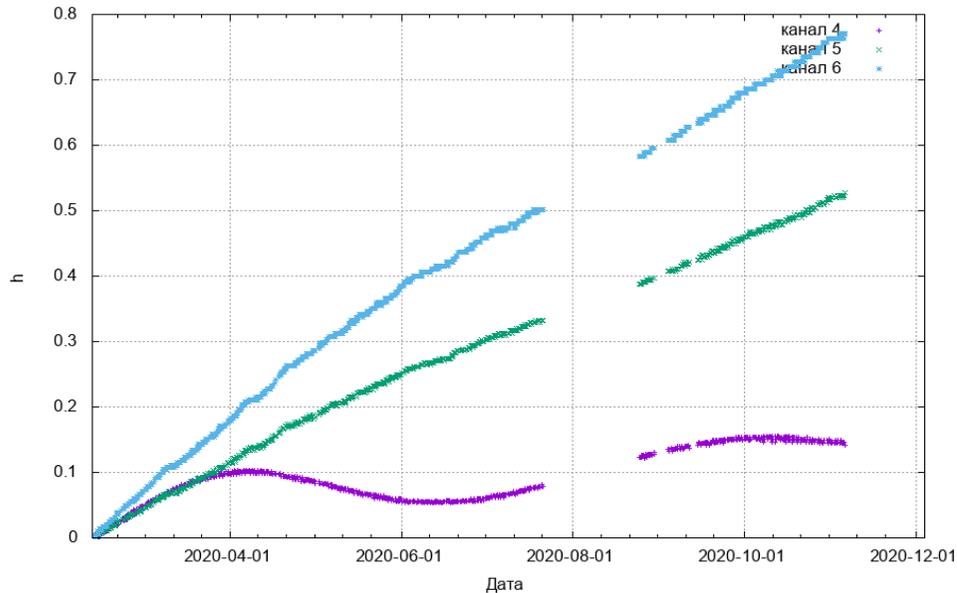
Изменчивость во времени показаний радиометра на бортовых мишенях для ИК-каналов: №4-слеваС; №5-центр, №6 - справа; отсчеты датчиков температуры посередине внизу.

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

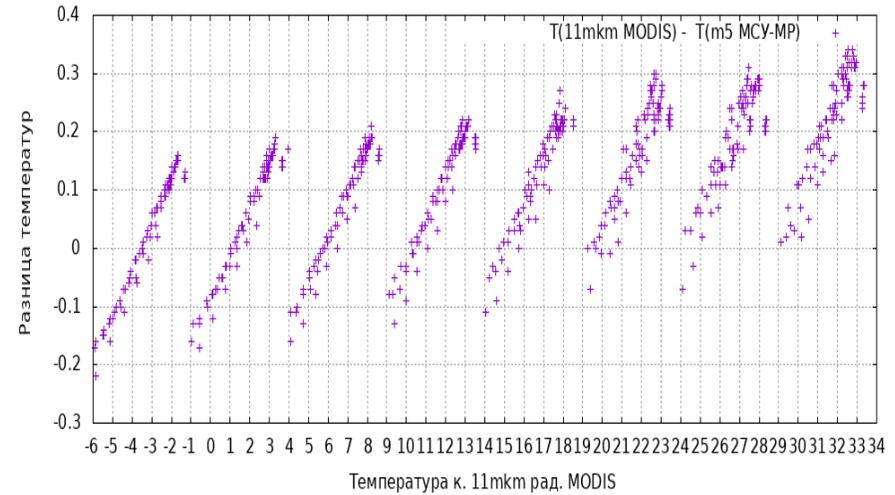
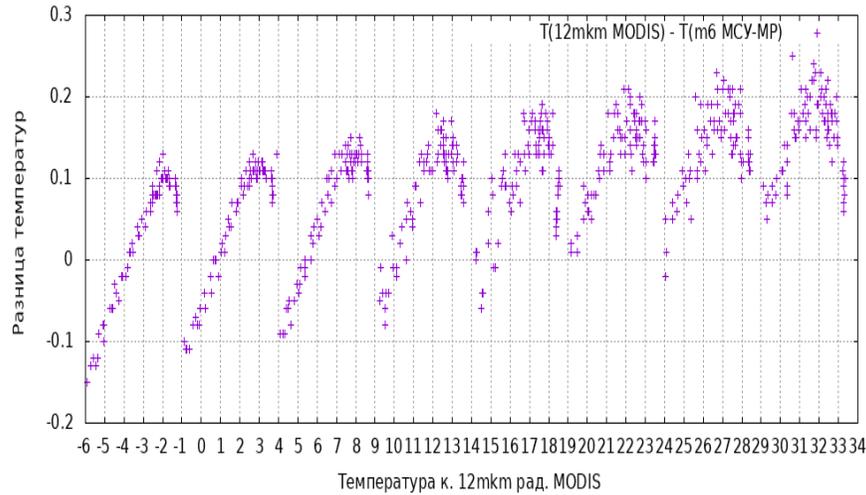


	a_0	a_1
m4	47,5	412,5174
m5	7,8	5,549235
m6	124.6	3,547725

Зависимость показателей ослабления от времени для каналов 4, 5 и 6

Кросс-калибровка с данными MODIS/AQUA

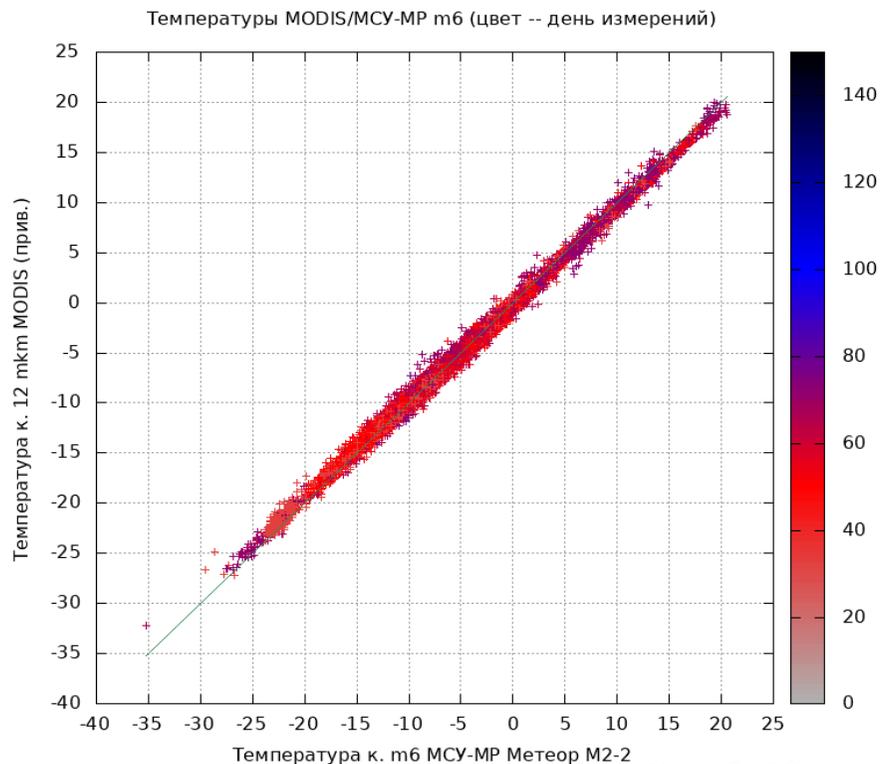
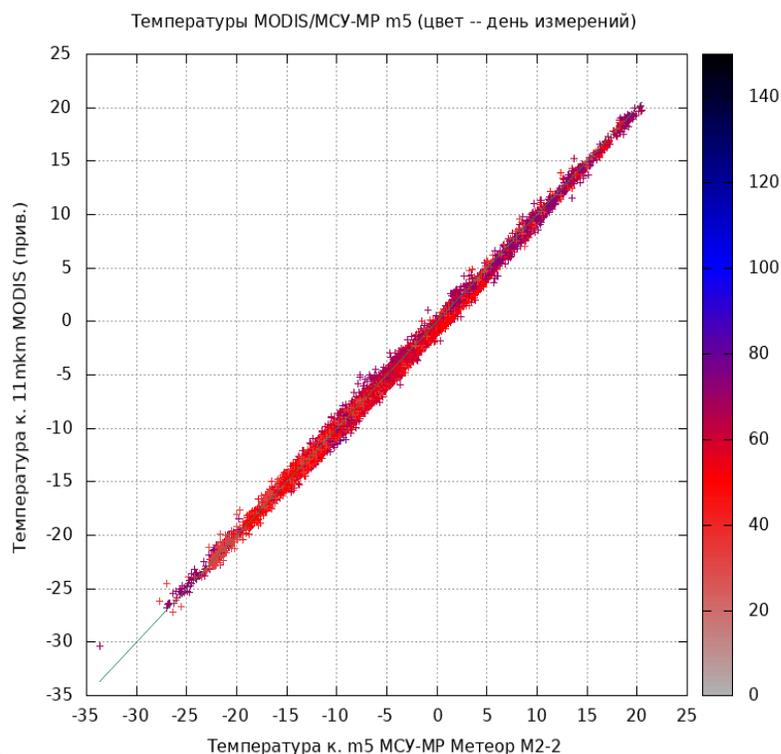
Модельные сравнения радиационных температур MODIS и МСУ-МР



В зависимости от характеристик атмосферы радиационные температуры радиометров могут отличаться до 0.5° .

Кросс-калибровка МСУ-МР с данными MODIS/AQUA

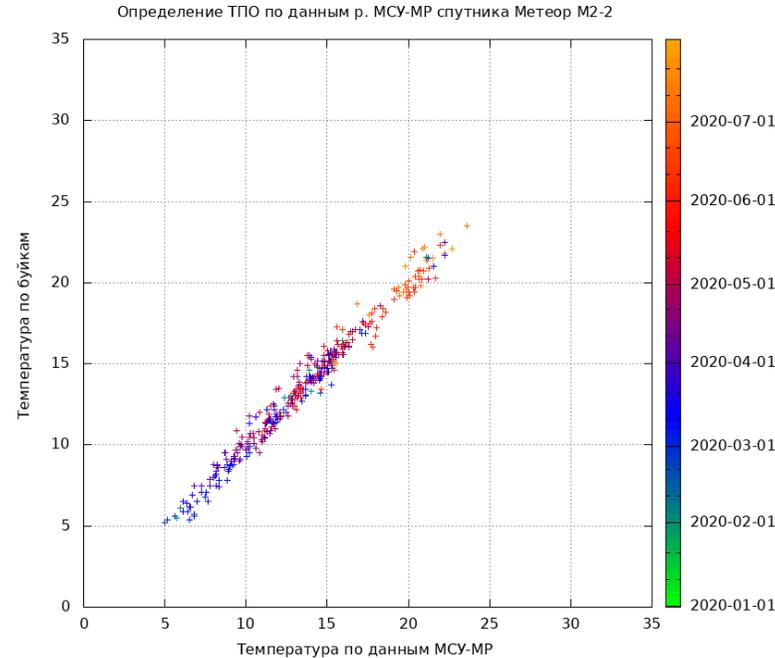
Для оценки корректности работы радиометра проводилась кросс-калибровка (23 000 измерений). Проверялись линейность характеристик усилителей и качество измерений при низких температурах.



Оптимальная подгонка радиационных температур с допустимой ошибкой в 0.5° показала:

- требуется поправка к температуре холодного тела: $+2.21^{\circ}$;
- усилители МСУ-МР демонстрируют линейную зависимость от температуры;
- поправка к температуре холодного тела позволила пересчитать коэффициенты калибровки по бортовым измерениям (слайд 5).

Построение ТПО. MCSST-технология с поправкой



Сравнение спутниковых температур моря и буйковых. 347 точек за 2020 год.

$$T_{\text{mcsst}} = a_0 + a_1 * T_5 + a_2 (T_5 - T_6) + a_3 (T_5 - T_6) (\sec(\theta) - 1) + a_4 (T_5 - T_6) (\sec(\theta) - 1)^2 + a_5 (\sec(\theta) - 1)^1 + a_6 (\sec(\theta) - 1)^2$$

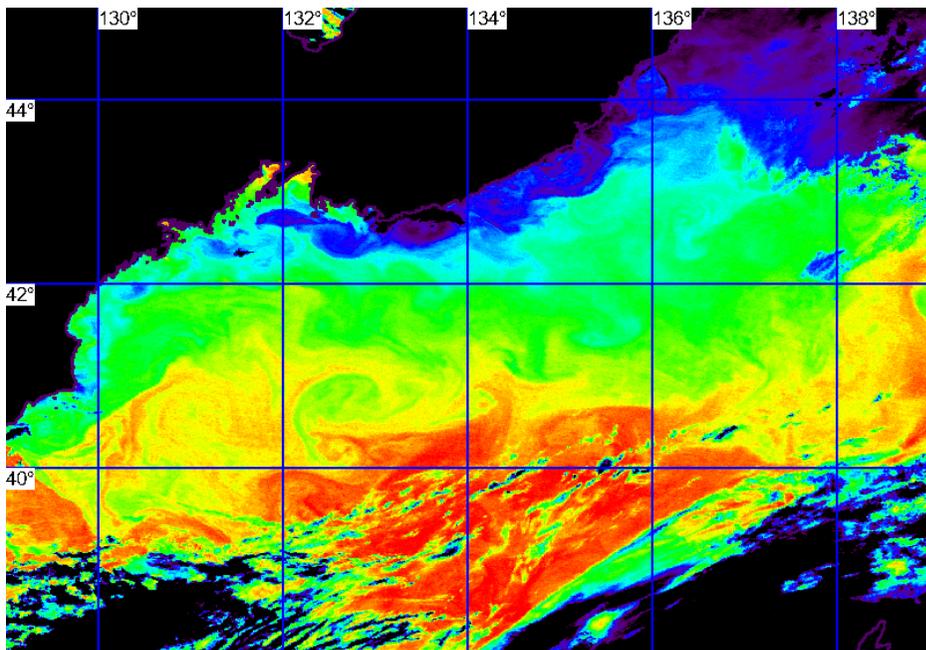
Поправки с коэффициентами а4-а6 введены по аналогии с формулами для Himavari-8.

Оценка систематической ошибки 0-0.125°, в начале работы 0.35 °.

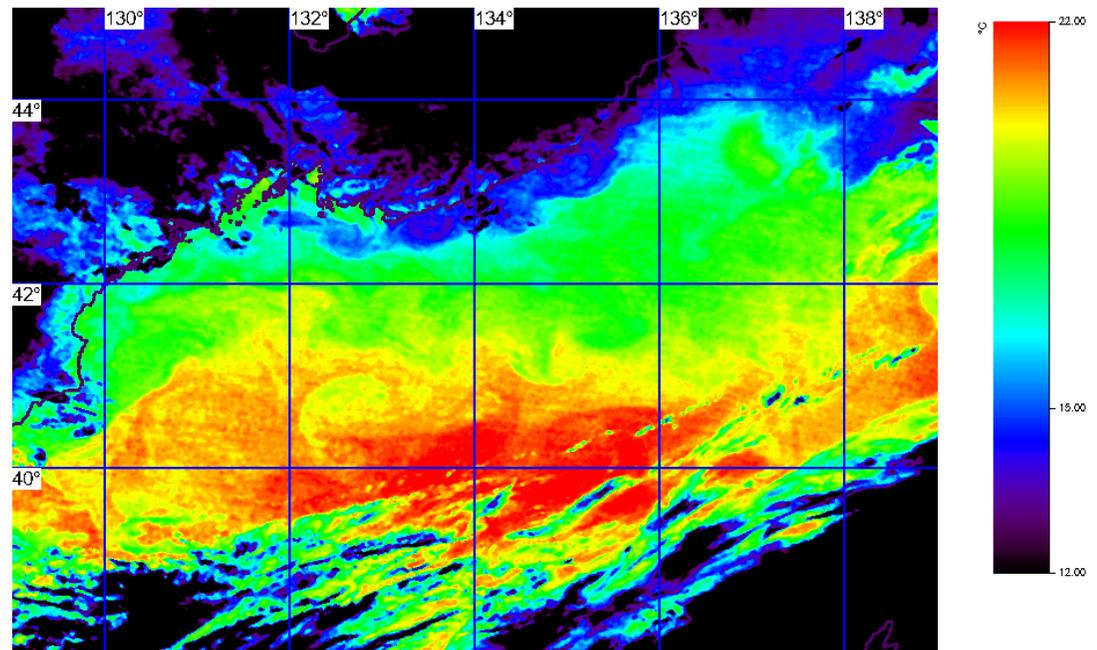
Среднеквадратичное отклонение составило 0.61 К

$$\begin{aligned} a_0 &= 0.67376943, \\ a_1 &= 1.08574742, \\ a_2 &= 2.07621593, \\ a_3 &= 0.97250054, \\ a_4 &= -3.35844936, \\ a_5 &= 0.38988808, \\ a_6 &= 4.57672391 \end{aligned}$$

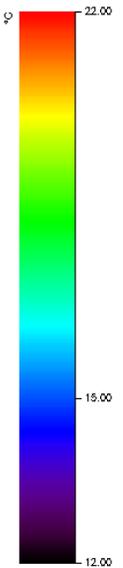
Пример карты температуры поверхности океана



***EOS AQUA 2020-07-08 17:00
(MODIS)***



***METEOR-M2 -2. 2020-07-08 18:05
(MCY-MP)***



Заключение

- 1. Шумы на некоторых каналах есть, но небольшие 2-3 отсчета в среднем.**
- 2. Криоосадки остались, хотя существенно в меньшем количестве.**
- 3. Для калибровки ИК-каналов следует учитывать поправку на температуру которая, по-видимому, обусловлена оседанием криоосадков на холодной мишени.**
- 4. Радиометр МСУ-МР спутника Метеор-М №2-2 по качеству данных превосходит аналогичный радиометр спутника Метеор-М №2. Он позволяет провести калибровку и расчет ТПО в соответствии с мировым стандартом качества.**
- 5. Введена квадратичная поправка на атмосферную массу, которая регулярно встречается в алгоритмах, но в «классическую» схему расчета ТПО по технологии MCSST не входит.**
- 6. Получившиеся ошибки расчета ТПО по технологии MCSST несколько меньше, чем типичные для спутников NOAA, MetOp и др. Калибровочные коэффициенты по буйкам не уточнялись, что говорит о хорошем качестве измерения ФСЧ.**



**Авторы выражают признательность
сотрудникам АО «РКС» Гектину Ю.М. и
Зайцеву А.А. за помощь в работе.**

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