

## Устранение влияния криоосадков на качество измерений радиометра МСУ-МР/Метеор-М №2

Алексанин А.И., Дьяков С.Е.

Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН (Владивосток, Россия)

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

Радиометр МСУ-МР [1] является близким аналогом радиометра AVHRR/NOAA, и его наличие на борту спутника Метеор-М №2 дает возможность построения по его данным разнообразных тематических продуктов. Заявленные технические характеристики прибора могут обеспечить расчет: температуры поверхности моря и суши, масок вода/лед, земля/снег, поверхность/облачность, вегетационного индекса, скоростей поверхностных течений; характеристик пожаров и наводнений; типов облачности и ее высоты, других параметров подстилающей поверхности и атмосферы. Радиометр МСУ-МР обладает некоторыми преимуществами перед AVHRR. Он производит измерения одновременно в шести спектральных каналах, а не в пяти. Каналы в видимой спектральной области существенно более чувствительны. Так, например, изображения радиометра позволяют уверенно детектировать стоки илистых рек, которые обычно не видны на изображениях AVHRR. Имеется и существенное различие. Оно относится к ширине спектрального канала с длиной волны в районе 3.7 мкм. Ширина канала у радиометра МСУ-МР значительно больше. С одной стороны, это повышает его чувствительность, существенную, например, при детектировании пожаров. С другой стороны, канал нельзя напрямую использовать при расчете, например, температуры поверхности воды по имеющимся трехканальным технологиям.

Основной проблемой использования ИК-каналов радиометра МСУ-МР является наличие криоосадков [1], оседающих тонкой пленкой на входных окнах ИК-датчиков и искажающих принятый сигнал. Со временем толщина пленки растет, что требует непрерывного обновления параметров алгоритма калибровки – пересчета отсчетов радиометра в радиационные характеристики измеренного излучения. Это предполагает построение функций коррекции параметров калибровки для выбранного временного интервала. Поскольку процедура очистки радиационного холодильника (РХ) разрушает пленки и изменяет концентрацию паров воды в районе датчиков, то после ее применения требуется построение новой функции коррекции алгоритмов калибровки.

Международные требования к точности калибровки ИК-каналов довольно высоки. В частности, температура поверхности океана на глубине 1 м, рассчитываемая по ИК-данным, должна иметь систематическую ошибку не более 0.1°C и случайную не более 0.8°C [2]. Нестабильность процедуры очистки РХ (разный временной интервал между чистками, не полное разрушение пленки

при очистке) делает маловероятным построения модели искажения сигнала пленкой на основе математических подходов восстановления требуемых зависимостей. В результате можно создать удовлетворяющий по точности алгоритм калибровки для временного интервала между двумя чистками радиационного холодильника [3] с потерей оперативности, либо выйти за пределы рекомендуемой точности [4].

Для решения проблемы предлагается рассмотреть подход, основанный на восстановлении оптических свойств пленки криоосадков в разных спектральных каналах. Для произвольного момента полета спутника по имеющейся телеметрии требуется определять величину ослабления пленкой сигнала с ошибкой, удовлетворяющей требуемой точности.

### Используемые данные и методика калибровки

В работе использовались данные радиометров МСУ-МР и AVHRR/MetOp, принятые в Спутниковом центре Дальневосточного отделения Российской академии наук [5] и архивные данные МСУ-МР ОАО «Российские космические системы». Данные радиометра AVHRR спутников MetOp применялись для оценки качества калибровки ИК-каналов МСУ-МР. Проверка проходила на изображениях воды. Поскольку временное рассогласование сканирования одной и той же поверхности разными радиометрами укладывалось в один час, то считалось, что температура воды за этот интервал времени не менялась. Использовались изображения, которые генерировались на близких трассах. Географическая привязка изображений обоих радиометров проводилась автоматически с пиксельной точностью [6,7]. Сравнение проводилось на ночных изображениях, чтобы не решать проблемы солнечного зайчика, дневного прогрева в штиль и возникновения теоретически возможных бликов от деталей спутника и пленок при освещении солнцем. Поскольку существующие в мире алгоритмы фильтрации облачности по одиночным ночным изображениям не позволяют ее надежно удалять, то дополнительно проводился визуальный контроль и отбраковка рассогласований показаний двух спутников по величине  $2\sigma$  – двойной величины стандартного отклонения.

Процедура калибровки проводилась по технологии NOAA/NESDIS, подробное описание которой можно найти в соответствующем руководстве [8]. Примеры использования этой процедуры в нестандартных ситуациях можно найти в работах [9,10]. Нестандартность ситуации с радиометром МСУ-МР состоит в наличии криоосадков, покрывающих входные окна ИК-датчиков. Требуется восстановить исходные величины регистрируемого излучения, убрав влияние пленки криоосадков. Для решения этой проблемы использовались отсчеты холодного ( $-13,8^{\circ}\text{C}$ ) и теплого ( $40^{\circ}\text{C}$ ) тел спутника, присутствующие в каждой строке сканирования радиометром. Применялись медианные оценки отсчетов, полученные в течение одного сеанса приема данных (рис.1). Построенные графики показывают, что колебания отсчетов холодного тела для каналов 4, 5 и 6 (нижняя часть рисунка) не велики (лежат в пределах 3, 5 и 20 единиц) за исключением моментов очистки РХ, которые характеризуются резкой изменчивостью величин. Стабильность отсчетов холодного тел объясняется особенностью функционирования радиометра – добавлением к сигналу радиометра величины, обеспечивающую, такую стабильность. Для канала 6 высокой стабильности не наблюдается – показания отсчетов холодного тела уменьшаются по похожей закономерности, присущей теплему телу, но при многократно меньшем диапазоне изменчивости. Для произвольного канала формирование отсчета описывается формулой:

$$I = a_0 + a_1 R + a_2 R^2 + C, \quad (1)$$

где  $I$  – отсчет радиометра;  $R$  – излучение зондируемой поверхности;  $C$  – добавляемая к сигналу величина;  $a_0, a_1, a_2$  – коэффициенты регрессии выбранного канала, слабо меняющиеся со временем. Квадратичный член вводится для учета нелинейности используемого усилителя сигнала от датчика.

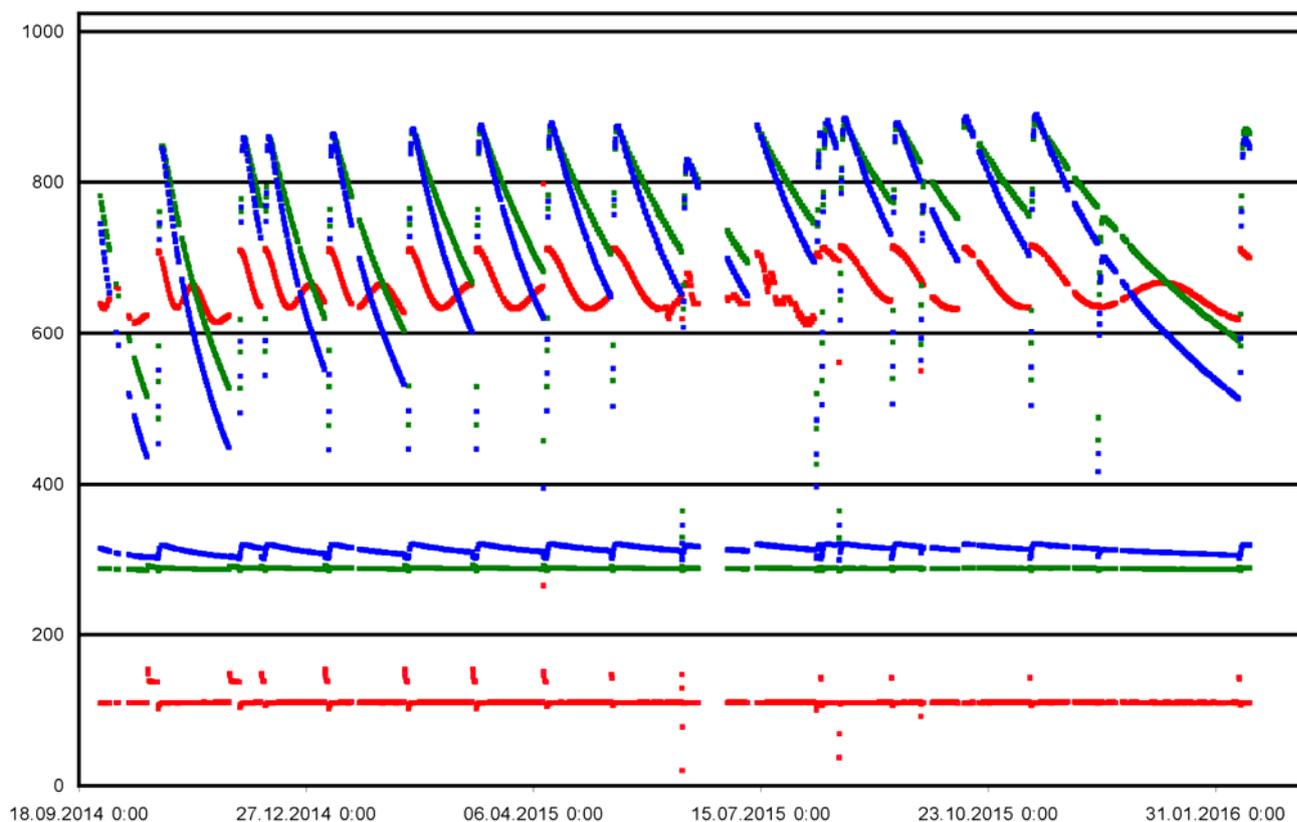


Рис 1. Изменчивость отсчетов радиометра МСУ-МР на теплом и холодном телах со временем для ИК- каналов 4 (красный цвет), 5(зеленый) и 6 (синий) за интервал времени 18.09.2014 – 31.01.2016.

Для расчета радиационных температур были оценены центральные волновые числа для спектральных аппаратных функций ИК-каналов, измеренных при предполетной подготовке прибора. Согласно [8], расчет лучеиспускательной способности для центрального волнового числа производится по формуле:

$$R(T) = R_{\text{plank}}(T \times \tilde{A} + \tilde{B}, \tilde{\nu}), \quad (2)$$

где  $R(T)$  – радиация в мВт/(м<sup>2</sup>·ср·см<sup>-1</sup>),  $T$  – температура в градусах Кельвина,  $\tilde{\nu}$  – центральное волновое число,  $R_{\text{plank}}(T)$  – функция Планка. Были рассчитаны коэффициенты линейных регрессий для расчета лучеиспускательной способности абсолютно черного тела (таблица 1).

Таблица 1. Рассчитанные спектральные характеристики ИК-каналов радиометра МСУ-МР

Номер канала	Спектральный диапазон	Центральное волновое число $\tilde{\nu}$	A	B
4	3,5-4,1 мкм	3.79 мкм	0.965	9.93
5	10,5-11,5 мкм	10.01 мкм	0.998	0.56
6	11,5-12,5 мкм	11.91 мкм	0.997	0.89

Отсчеты радиометра на теплой и холодной мишенях обычно предназначаются для контроля и коррекции показаний прибора в полете при его нестабильной работе. Здесь для решения задачи будем предполагать, что радиометр работает стабильно: жестко выдерживается коэффициент усиления сигналов от датчиков и усиление линейно ( $a_2=0$ ); нет зависимости отсчетов от угла сканирования; оптические свойства пленки криоосадков однородны, изотропны и постоянны при постоянной толщине. Тогда уравнение (1) для отсчетов от холодного и теплого тел можно записать в виде:

$$I_{cool} = a_0 + a_1 R_{cool} e^{-h} + C \quad (3)$$

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

где индексы *cold* и *hot* соответствуют холодному и теплomu телам,  $h$  – показатель ослабления сигнала при прохождении излучения через пленку криоосадков,  $R_{cold}$  и  $R_{hot}$  – рассчитанное согласно (2) излучение для абсолютно черных тел с заданной температурой.

Анализ рисунка 1 показывает, что при полной очистке РХ отсчеты теплого тела близки к постоянной величине и слабо увеличиваются со временем. Будем полагать, что в момент очистки РХ пленка криоосадков полностью разрушаются, а искажающее сигнал влияние пара незначительно. Косвенно это подтверждается экспериментом за 13.06.2015, когда нагрев при очистке был недостаточным для удаления пленок, что привело к резкому уменьшению величин отсчетов на теплом теле сразу после очистки. Тогда в такие моменты можно полагать, что  $h=0$  и  $C=0$ . Таким образом, мы для каждого момента времени, следующим за очисткой РХ, можем восстановить коэффициенты  $a_0$  и

$a_1$ . Они асимптотически стремятся к своим предельным значениям. Зная коэффициенты  $a_0$  и  $a_1$  для произвольного спутникового изображения можно рассчитать по отсчетам теплого и холодного тел требуемые величины и  $h$  согласно уравнениям (3).

## Результаты расчетов

Анализ графиков изменчивости коэффициентов  $a_0$  и  $a_1$ , полученных в моменты времени сразу после очистки РХ, позволил оценить их предельные значения. В произвольный момент времени можно рассчитать величины  $h$  и  $C$ , решая систему уравнений (3). Зная эти параметры для произвольного отсчета радиометра можно рассчитать радиационные характеристики детектируемого излучения  $R$ , используя для этого уравнение (1). Тогда решение уравнения (2) относительно  $T$  дает соответствующую отсчету величину радиационной температуры. Это позволяет сравнить радиационные температур спектральных каналов 5 и 6 с температурами спутников MetOp, имеющих близкие центральные волновые числа. Теоретическое моделирование отличий каналов двух спутников при разных параметрах атмосферы с помощью модели MODTRAN 4-ой версии показало, что рассогласование радиационных температур на воде для обоих каналов лежит в пределах  $0.5^{\circ}\text{C}$  [3]. Реальное же сравнение показывает, что рассогласования существенно больше - до  $2^{\circ}\text{C}$  для канала 5 и до  $6^{\circ}\text{C}$  для канала 6 (рис.2). При этом наблюдается четкий линейный тренд при рассмотрении зависимости рассогласований от радиационной температуры спутника MetOp.

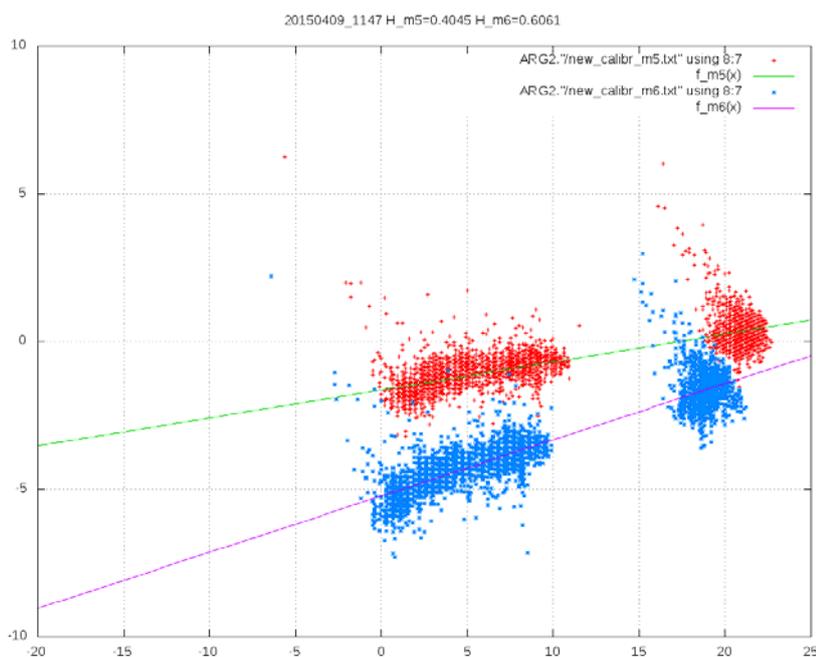


Рис.2. Пример рассогласований радиационных температур спектральных каналов 5 (красные точки) и 6 (голубые точки) МСУ-МР с соответствующими каналами AVHRR/MetOp в зависимости от температуры MetOp.

Рассогласования радиационных температур существенные и коррекцией подобранных параметров не устраняются. Зато они хорошо устраняются оптимальным подбором поправок к температуре датчиков холодной и теплой мишеней. Расчеты показали, что эти поправки устойчиво определяются оптимизационными методами, и они фактически постоянны во времени. Их учет привел к падению рассогласований радиационных температур двух спутников до величин 0.2-0.3°C для обоих спектральных каналов. Анализ результатов позволяет сделать следующие выводы. Между двумя последовательными очистками РХ наблюдается со временем ослабление сигнала, регистрируемого ИК-датчиками. Зависимость ослабления от времени близка к линейной (рис. 3). Линейные регрессии показателей ослабления для датчиков пересекают ось времени примерно в районе начала периода между очистками РХ. Стабильность поправок к температуре холодной и теплой мишеней и возможность расчета ослабления сигнала криоосадками на датчиках непосредственно по показаниям излучения мишеней позволяют утверждать, что рассчитанные калибровки ИК-каналов будут стабильны в течение длительного времени (месяцы и годы).

Несмотря на значительное количество допущений, принятых при построении процедуры калибровки, результаты вполне удовлетворительные. Уточнение можно получить через полномасштабную калибровку посредством применения процедуры пересчета излучения близких каналов разных радиометров друг в друга на основе модели прохождения излучения через атмосферу, характеристики которой берутся обычно из файлов прогноза погоды. Конечный контроль качества калибровки проводится на основе *in situ* измерений. Для этого необходимо создать алгоритм расчета температуры поверхности воды [9,10].

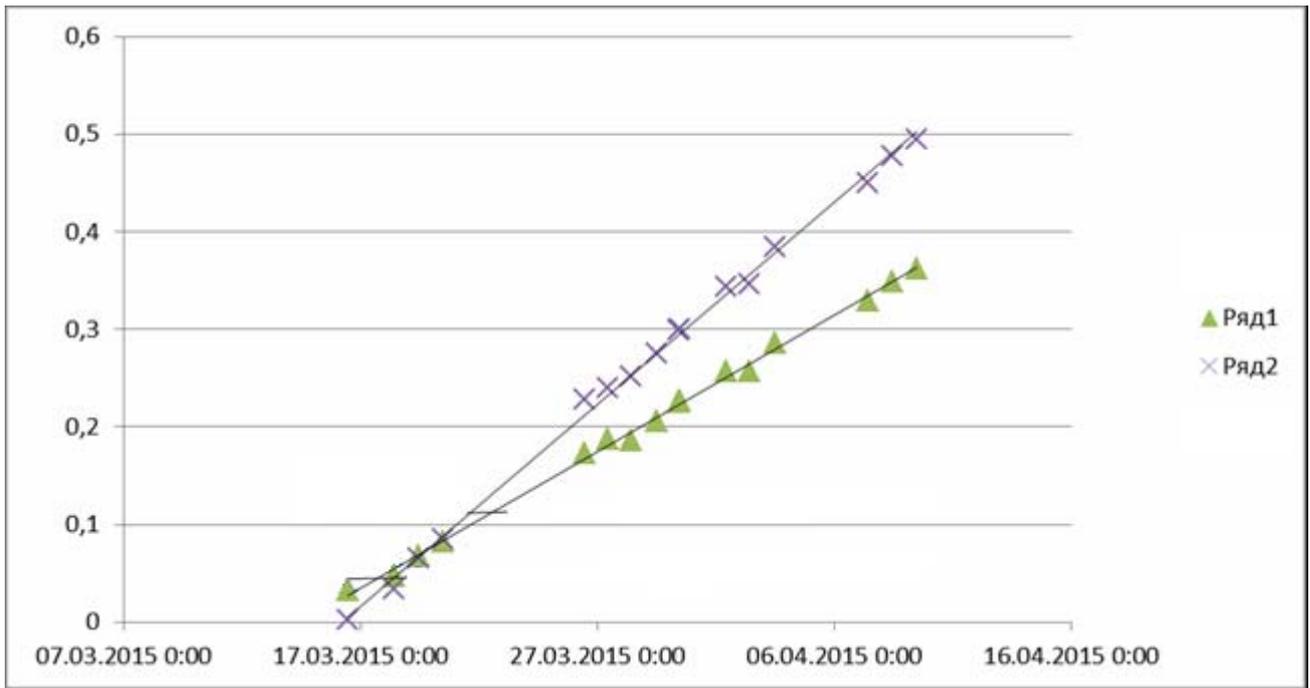
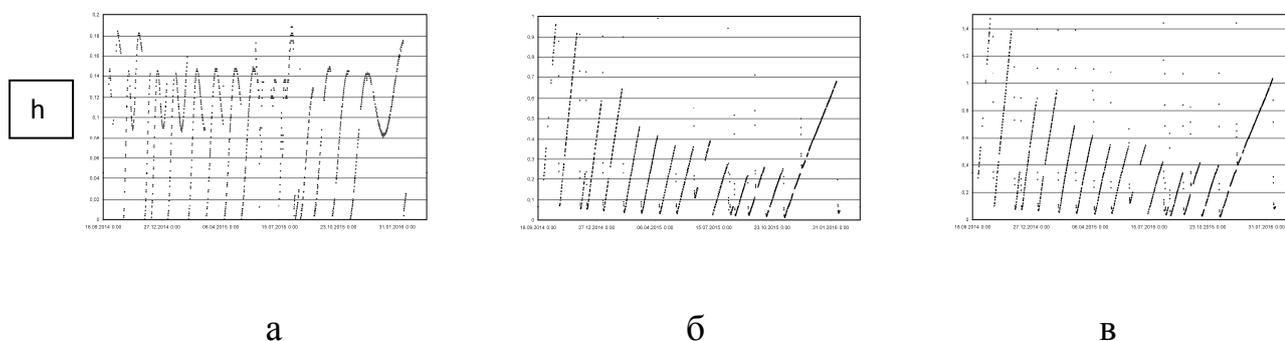


Рис.3. Зависимости показателей ослабления между двумя последовательными чистками РХ от времени: ряды 1 и 2 – показатели ослабления сигнала для датчиков каналов 5 и 6 на теплой мишени.

## Анализ изменчивости характеристик криоосадков

Для понимания процессов, происходящих на борту спутника, был проведен анализ изменчивости восстанавливаемых параметров  $C$  и  $h$ . Графики изменчивости этих двух величин для конкретного канала похожи друг на друга. Межканальная изменчивость параметров существенно отличается. Размах изменчивости параметра  $C$  нарастает от 11 отсчетов для канала 4 до 350 для канала 6. Скорость роста как  $h$  так и  $C$  падают со временем, но остаются достаточно большими и год спустя после запуска спутника. На рисунке 4 представлены рассчитанные величины  $h$  для трех ИК-каналов за тот же интервал времени, что и для рис.1. Минимальное ослабление сигнала, которое можно рассчитать по величине  $h$ , наблюдается для канала 4, которое не превышает 20% и довольно медленно уменьшается со временем. Для каналов 5 и 6 сигнал может ослабляться в 3 раза, и ослабление падает до 30-50% к октябрю 2015 при месячных интервалах между чистками РХ. Таким образом, оптические свойства пленки криоосадков существенно различны для разных длин волн.

В отличие от почти линейного роста показателя ослабления  $h$  у каналов 5 и 6 показатель канала 4 демонстрирует колебания. Для получения количественной оценки колебаний разберем изменчивость показателей за интервал времени между чистками РХ. Для этого вычтем из графиков изменчивости  $h$  от времени линейный тренд. Результаты представлены на рисунке 5. Можно отметить, что на графиках каналов 5 и 6 также наблюдаются периодические колебания, но очень слабые. Наиболее вероятной причиной возможно является наличие интерференционных эффектов при прохождении излучения через пленку, когда ее толщина становится близкой к длине волны.



Ри.4. Изменчивость показателя ослабления  $h$  сигнала со временем для ИК-каналов 4 (а), 5(б) и 6 (в).

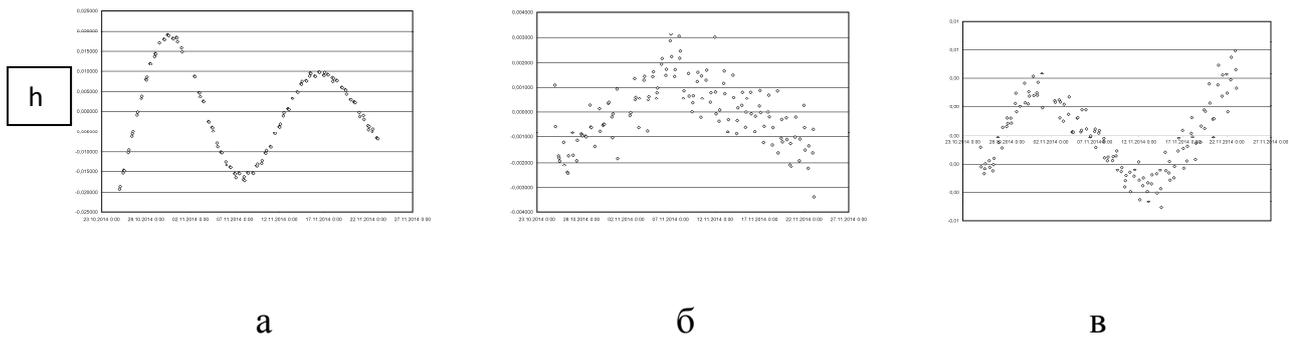


Рис.5. Изменчивость отклонения показателя  $h$  от линейного тренда для интервала между чистками РХ для ИК- каналов 4 (а), 5(б) и 6 (в).

Прежде, чем приступить к созданию алгоритма расчета ТПО, нужно оценить влияние на результат различий в характеристиках отражения сторон двухстороннего зеркала и влияние засветки. Для видимых каналов спектра эти различия существенные. Так, например, сигнал от разных сторон зеркал достигает 10%. На рис.6 приведен фрагмент изменчивости детектируемого датчиками каналов 5 и 6 сигнала от теплой мишени в зависимости от времени. Можно отметить, что различия между сигналами от разных сторон зеркала незначительны. Наблюдается некоторая разница показаний между дневными и ночными отсчетами. Если же из показаний удалить тренд, обусловленный нарастанием слоя криоосадков, то эта разница небольшая и укладывается в 2 отчета.

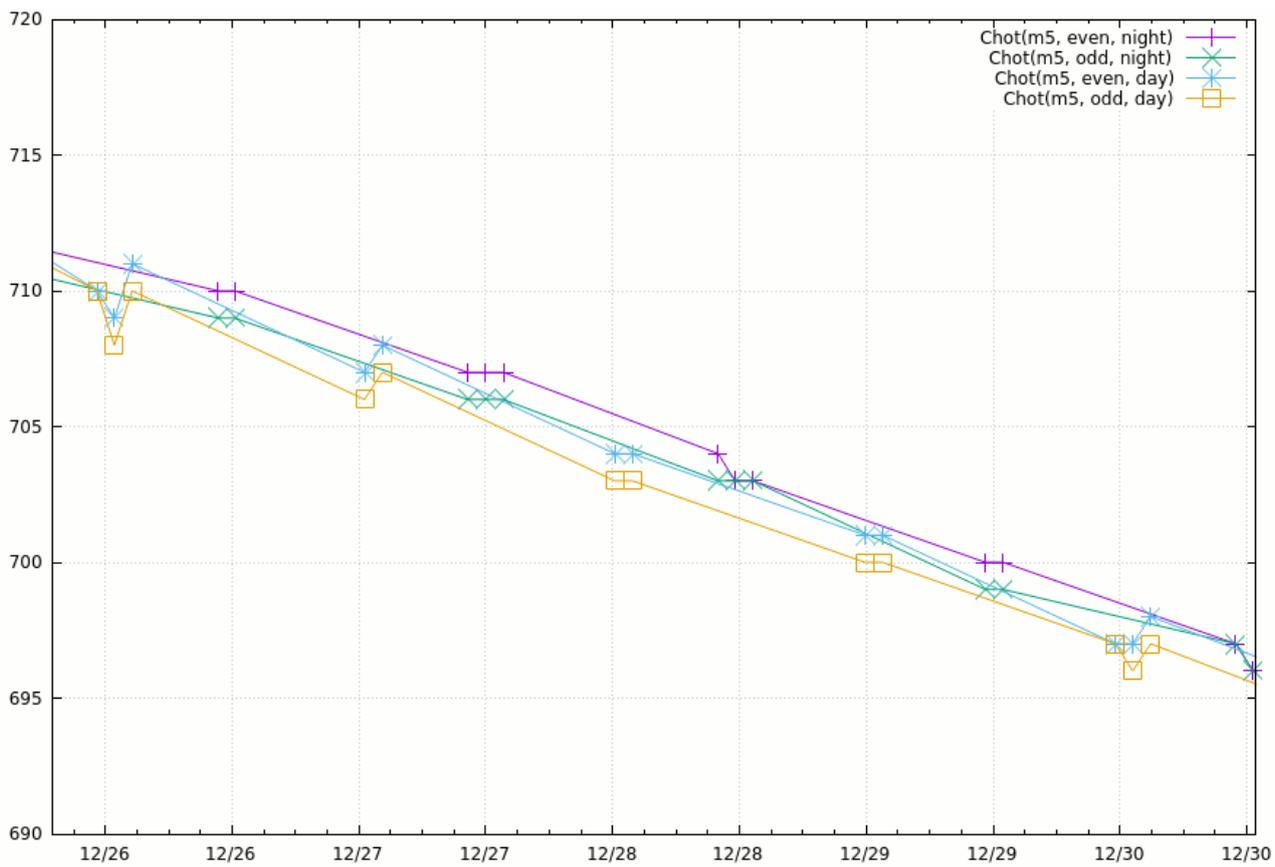


Рис.6. Зависимость отсчетов радиометра для каналов 5 и 6 от времени для разных сторон зеркала для ночи и дня.

## Расчет ТПО

Температура поверхности океана, восстановленная по MCSST технологии NOAA/NESDIS, определяется на основе измерений 5-го и 6-го каналов с помощью следующей регрессионной зависимости:

$$T_{MCSST} = a_0 + a_1 T_5 + a_2 (T_5 - T_6) + a_3 (T_5 - T_6) (\sec(\theta) - 1),$$

в которой  $T_5$  – радиационная температура пятого канала,  $T_6$  – радиационная температура шестого канала,  $\theta$  – угол сканирования, а  $a_0$ - $a_3$  – регрессионные коэффициенты. Коэффициенты уравнения оптимально подбирались на основе минимизации рассогласований буйковых и спутниковых измерений ТПО. Данные были накоплены за интервал времени (2014/10/14 – 2015/12/10) в Дальневосточном регионе и содержали 118 измерений с дрейфующих буев. В первую очередь строился алгоритм расчета ТПО для ночи. При этом выяснилось, что калибровки спутника МЕТОР-В, на основе которых строился алгоритм расчета радиационных температур спутника Метеор-М №2, не дают нужной точности расчета ТПО. Общая ошибка расчета этим спутником удовлетворяла требованиям точности (менее  $0.8^\circ\text{C}$ ), но систематическая ошибка нет. Последняя порой достигала  $0.4^\circ\text{C}$  при требовании менее  $0.1^\circ\text{C}$ . Поэтому, помимо расчета коэффициентов  $a_0$ - $a_3$ , уточнялись также коэффициенты калибровок и поправки к температурам холодного и теплого тел. Результаты расчетов показали, что температура ошибка расчета температуры лежит в допустимых пределах как для ночи так и для дня ( $0.7^\circ\text{C}$ ), а систематическая ошибка не превосходит  $0.1^\circ\text{C}$ . Пример карт ТПО приведен на рис.7.

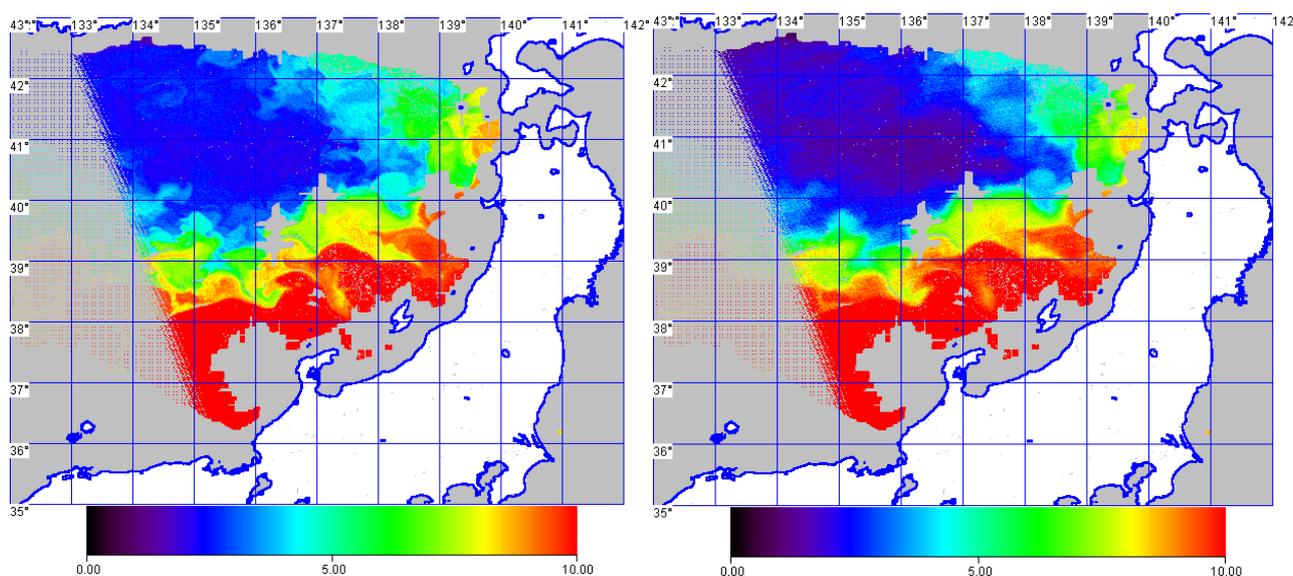


Рисунок 7. Фрагменты карт ТПО спутника МЕТОР-В (2015/03/27 11:05UTC) (слева) и Метеор-М №2 (2015/03/27 11:31UTC) (справа), Японское море.

## **Заключение**

Не смотря на значительные проблемы, существующие при обработки ИК-данных радиометра МСУ-МР спутника Метеор-М №2, возможно построение модели влияния криоосадков на регистрируемый радиометром сигнал. Кросс-калибровка показаний радиометра с измерениями радиометра AVHRR/МЕТОР-В позволяет как рассчитать параметры модели учета криоосадков, так и создать алгоритмы калибровки каналов и расчета температуры океана по технологии NOAA/NESDIS. Ошибки лежат в пределах рекомендуемой точности. Калибровку можно считать устойчивой в течение полугода и более. Авторы выражают благодарность за помощь в работе АО «Российские космические системы» и Гектину Ю.М.

## Список литературы

1. Акимов Н.П., Бадаев К.В., Гектин Ю.М., Рыжаков А.В., Смелянский М.Б., Фролов А.Г. Многозональное сканирующее устройство малого разрешения МСУ-МР для космического информационного комплекса «Метеор-М». Принцип работы, эволюция, перспективы// Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2015, том 2, выпуск 4, с.30-39.
2. Donlon C., Robinson I., Casey K. S., Vazquez-Cuervo J., Armstrong E., Arino O., Gentemann C., May D., LeBorgne P., Piollé J., Barton I. J., Beggs H., Poulter D. J. S., Merchant C. J., Bingham A., Heinz S., Harris A., Wick G., Emery B., Minnett P., Evans R., Llewellyn-Jones D., Mutlow C., Reynolds R. W., Kawamura H., Rayner N., The global ocean data assimilation experiment high-resolution sea surface temperature pilot project// *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2007, Vol. 88, No. 8, pp. 1197-1213.
3. Алексанин А.И., Дьяков С.Е. Кросс-калибровка данных ИК-каналов радиометра МСУ-МР спутника Метеор-М №2 // Тринадцатая всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, ИКИ РАН, 16-20 ноября 2015 г. Сборник тезисов конференции. 2015, М:ИКИ РАН, с.8.
4. Асмус В.В., Кровотынцев В.А., Макриденко Л.А., Милехин О.Е., Соловьев В.И., Успенский А.Б., Фролов А.В., Хайлов М.Н. Система гидрометеорологических спутников серии «Метеор-М» и результаты летних испытаний спутника «Метеор-М» №2// Тезисы докладов международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создание космических систем дистанционного зондирования Земли». 2015, Москва:ВНИИЭМ, с.4-5.
5. Центры коллективного пользования Российской Академии Наук. 2004. М.: Наука, 192 с.
6. Катаманов С.Н. Разработка автоматического метода географической привязки изображений МСУ-МР полярно-орбитального спутника "Метеор-М" №1 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2014, Т.11, №4, с. 276-285.
7. Катаманов С.Н. Автоматический метод географической привязки изображений AVHRR/3 от полярно-орбитальных спутников серии MetOp // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2015, т.12, №3, с. 63-74.
8. Geoffrey Goodrum, Katherine B. Kidwell, Wayne Winston NOAA KLM user's guide // <http://www2.ncdc.noaa.gov/docs/klm>
9. Алексанин А.И., Дьяков С.Е., Катаманов С.Н., Наумкин Ю.В. Технология обработки данных полярно-орбитальных спутников FY-1C/1D для

мониторинга физических полей океана// Подводные исследования и робототехника, 2006, №2, с.82-91.

- 10.Алексанин А.И., Дьяков С.Е. Кросс-калибровка ИК-каналов спутника MTSAT-1R и алгоритм расчета температуры поверхности моря// Исследование Земли из космоса, 2010, № 5, с. 3–10.