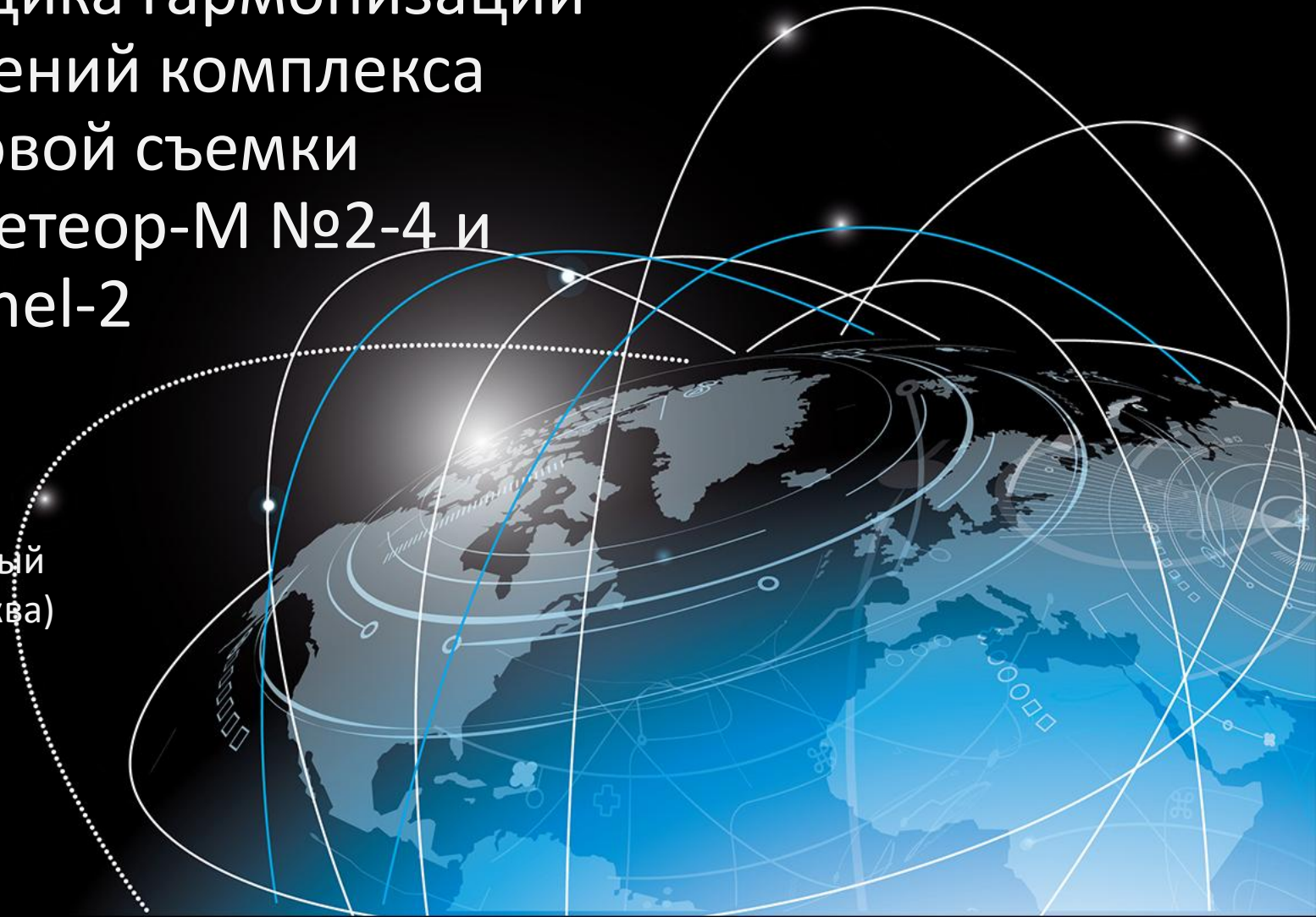
РКС
РОССИЙСКИЕ КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Экспериментальная методика гармонизации радиометрических измерений комплекса многозональной спутниковой съемки космического аппарата Метеор-М №2-4 и данных радиометра Sentinel-2

А.И.Васильев, Н.В. Воронков

АО «Российские космические системы», Научный центр оперативного мониторинга Земли (Москва)

XXIV Международная конференция
«Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»
(9 – 13 ноября 2026 г., Москва)



Актуальность

Комплекс многозональной спутниковой съемки (КМСС) Метеор-М №2-4 – уникальный российский космический комплекс ДЗЗ:

- обеспечивает ежесуточный мониторинг северной Евразии;
- полоса захвата одного пролета - 1000км;
- пространственное разрешение – 60м;
- имеет базовые спектральные каналы (Nir-Red-Green) для природно-ресурсного мониторинга
- данные открыто распространяются для отдельных сцен и ежесуточных мозаичных покрытий веб-сервисом «Банк базовых продуктов» НЦОМЗ (bbp.ntsomz.ru)
- исследователями (ИКИ РАН) традиционно рассматривается как дополнение к данным MODIS Terra/Aqua

Открытым консорциумом геопространственных данных (OGC – Open Geospatial Consortium) определен мировой тренд гармонизации данных КС ДЗЗ природно-ресурсного назначения в части радиометрических и геометрических показателей (OGC Testbed 19…, 2024). В качестве базовой эталонной КС ДЗЗ рассматривается Sentinel-2

Постановка задачи и исходные данные

Для кросс-калибровки данных КМСС на основе квази-синхронной съемки относительно MODIS Terra/Aqua традиционно используются (исследования ИКИ РАН):

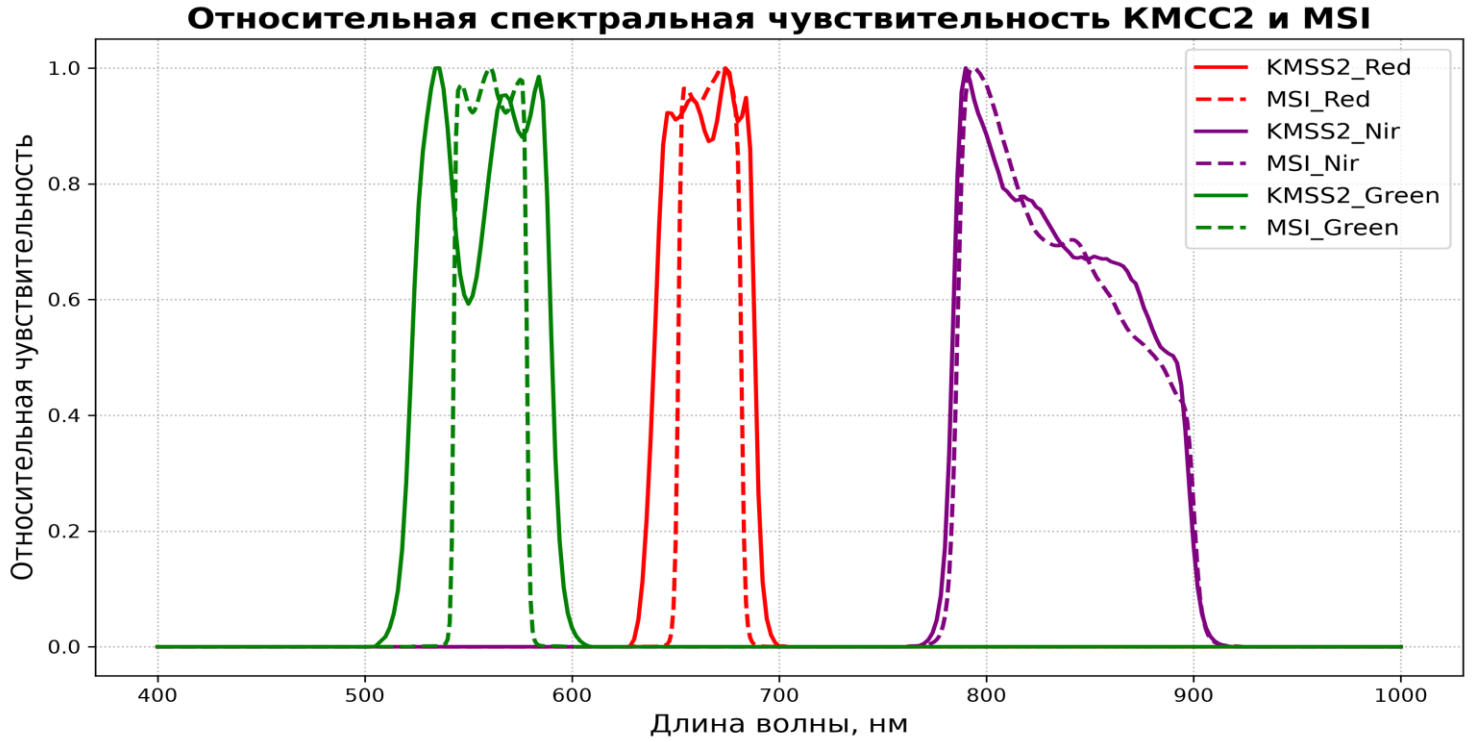
1. Оценивается мультипликативная поправка к данным КМСС относительно снимков MODIS
2. Данные съемки Гренландии или Антарктиды



Исследуется задача гармонизации данных КМСС Метеор-М №2-4 относительно квази-синхронных снимков MSI Sentinel-2:

1. Рассматривается двухпараметрическая модель линейной регрессии
2. Данные съемки песчаного региона Такла-Макан (в качества яркого тест-объекта)
3. Данные съемки Средиземного моря (в качестве темного тест-объекта)

Сравнение характеристик съемочных систем MSI и КМСС



$$\rho_{изм} = \frac{\int_a^b \rho_{пов}(\lambda) * S(\lambda) * f(\lambda) d\lambda}{\int_a^b S(\lambda) * f(\lambda) d\lambda}$$

$$SBAF = \frac{\rho_{изм}^{КМСС2}}{\rho_{изм}^{MSI}}$$

S – внешнеатмосферная спектральная плотность потока солнечного излучения $\left(\frac{Вт}{м^2 * мкм}\right)$,
f – функция относительной спектральной чувствительности канала,
$\rho_{пов}$ - КСЯ материала отражающей поверхности.

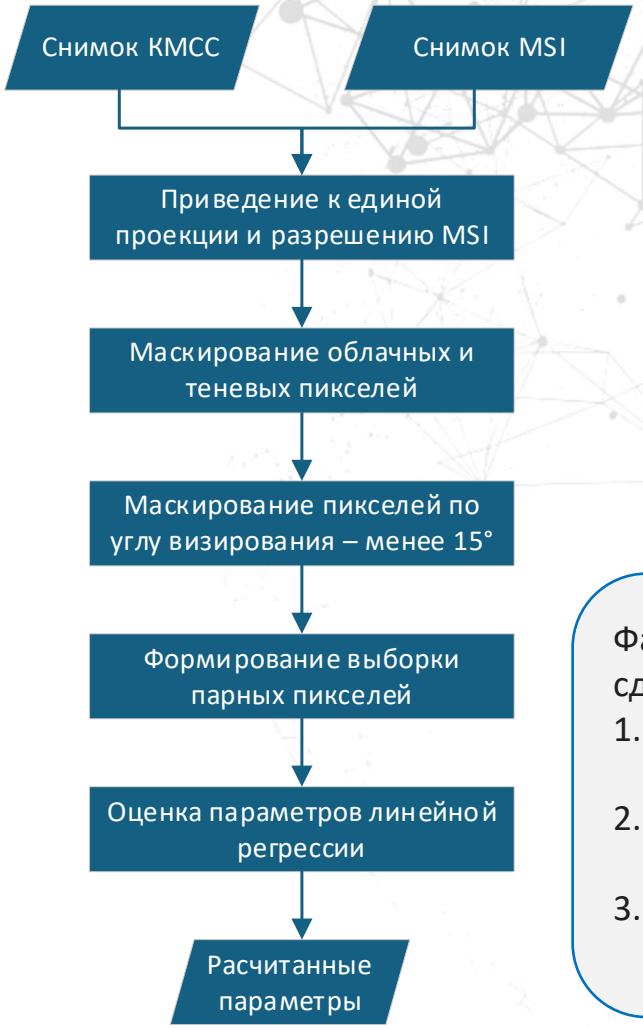
Канал	SBAF для песка	SBAF для воды
NIR	1.0	1.0
RED	0.999	1.001
GREEN	0.986	1.017

Анализ сопоставимости ФСЧ:

- Высокое соответствие ФСЧ для NIR-канала
- Значительное различие между ФСЧ каналов видимого диапазона
- SBAF-показатель не превышает отклонение в 5% для каналов видимого диапазона

Применение методики квази-синхронной кросс-калибровки для оценки параметров гармонизации одиночных пар снимков КМСС и MSI

Методика расчета параметров гармонизации для пары снимков

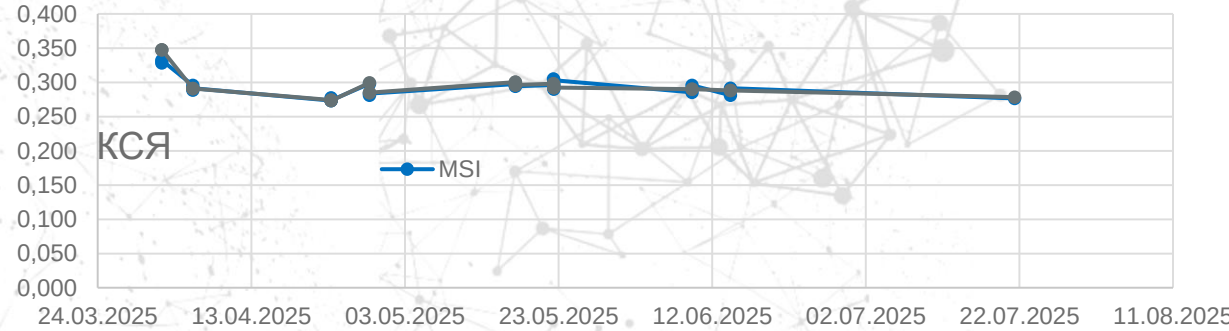


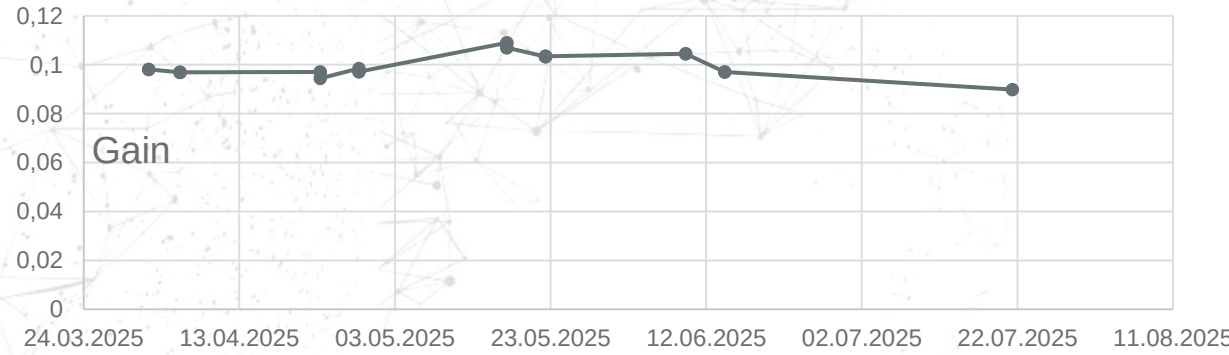
Для подхода характерна сильная изменчивость рассчитываемых параметров

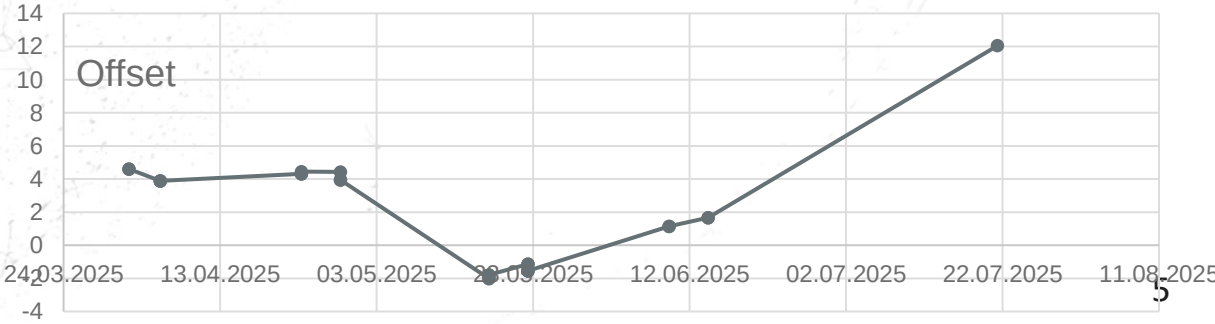
Факторы, влияющие на изменчивость сдвига:

1. Влияние атмосферы для снимков водной поверхности
2. Различие КСЯ типов поверхности Такла-Макан
3. Ограничения методики (разнообразие скатеррограмм)

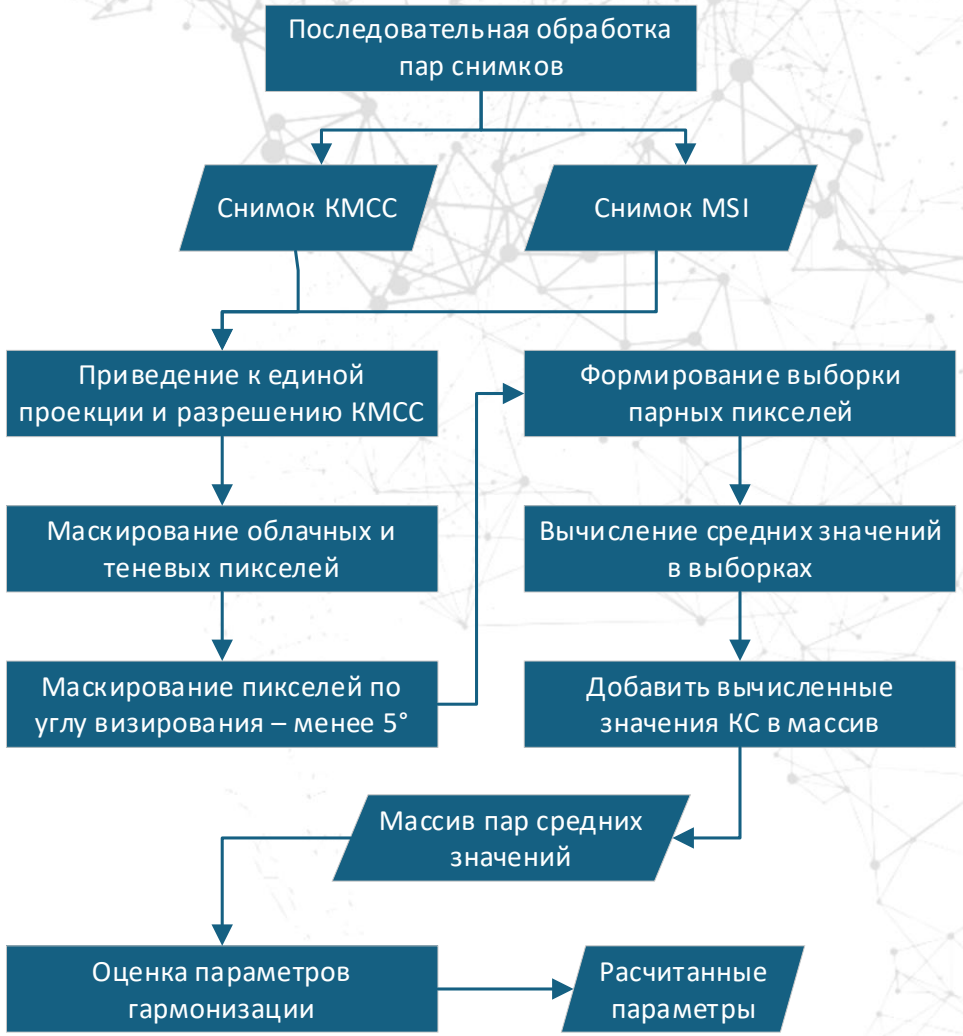
Обработка данных NIR-канала за апрель-июль 2025г.





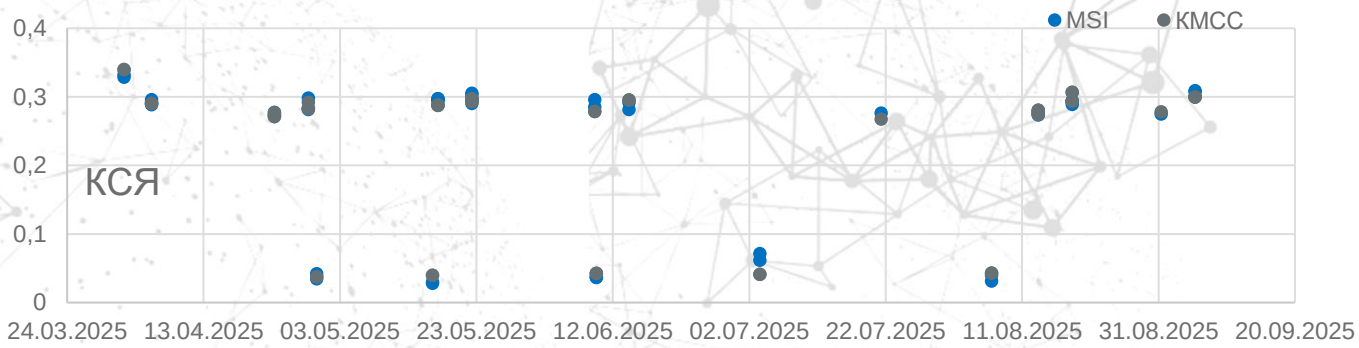


Методика оценки параметров гармонизации КМСС и MSI на основе обработки множества пар снимков



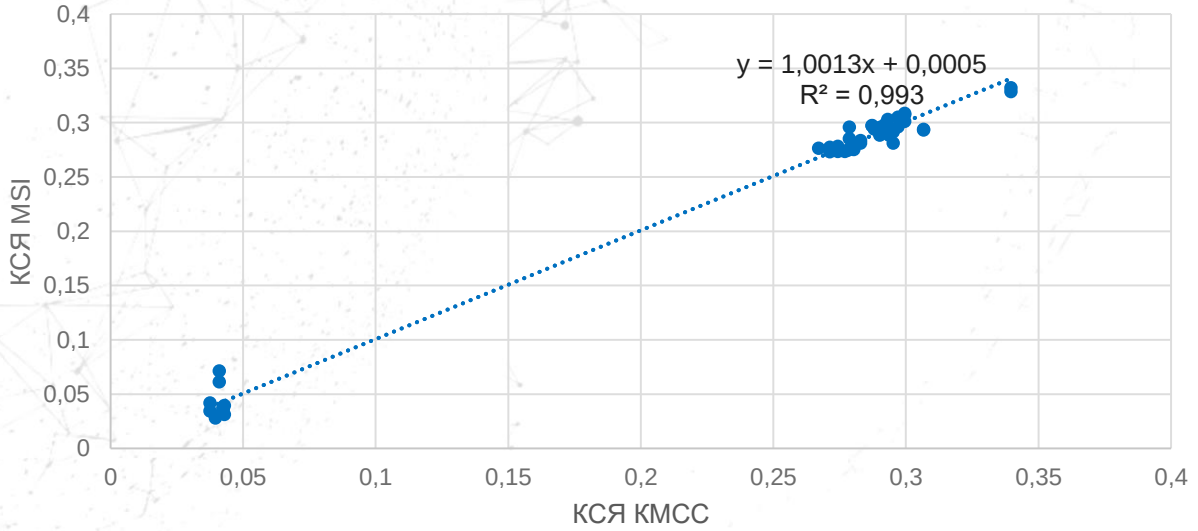
Оценка параметров выполнялась методом симулированного отжига

Обработка данных NIR-канала



Для всего временного ряда минимизировалась функция $E_{\text{ошиб}} = \sum_i \left(\rho_i^{MSI} - \rho_i^{\text{КМСС2}}\right)^2$, где суммирование ведется по всем парам временного ряда.

Скатерограмма рассчитанных величин КСЯ

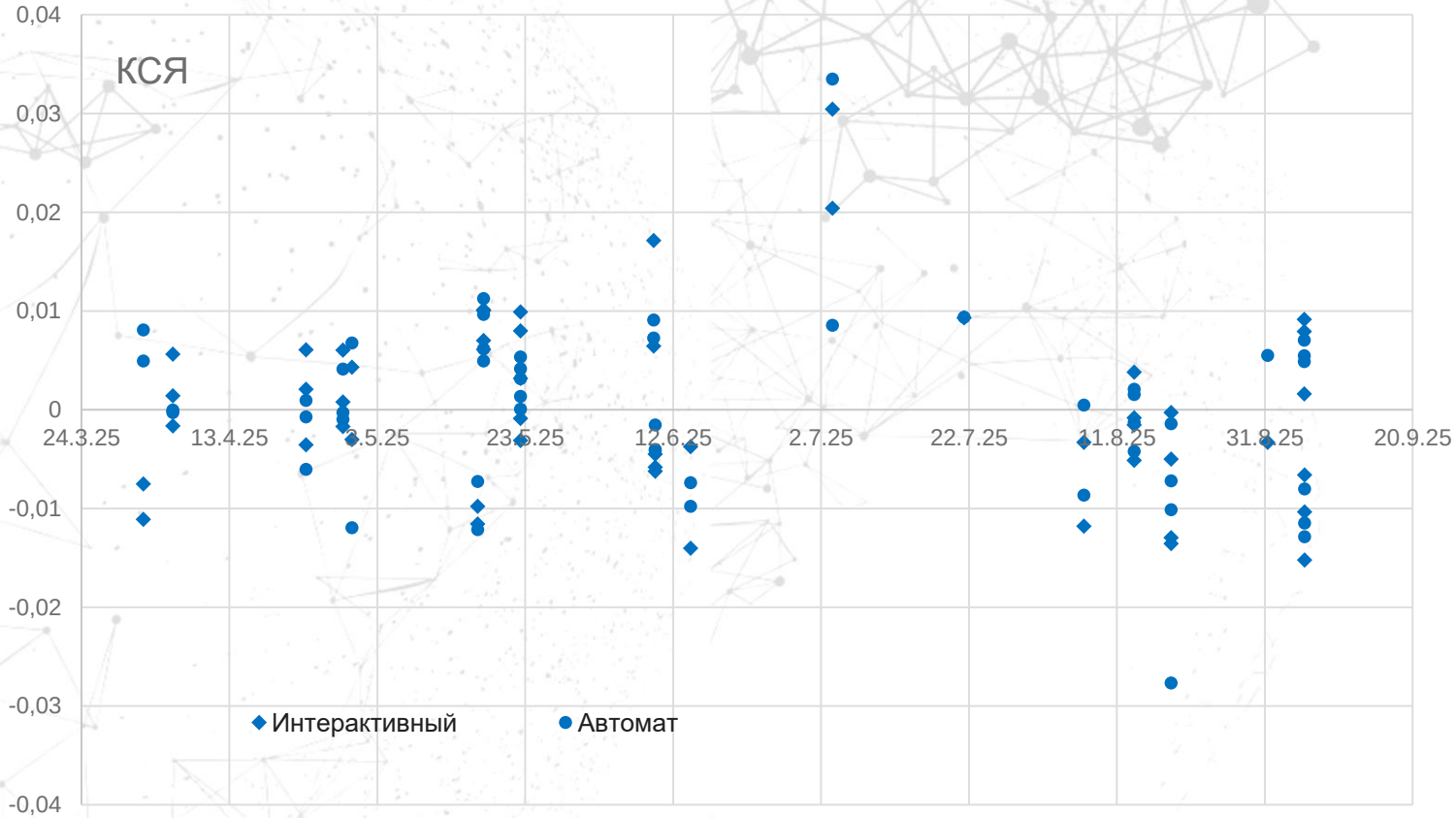


Автоматическая подготовка данных для гармонизации величин КСЯ съемочных систем КМСС и MSI

Особенности автоматического формирование выборки пар пикселей:

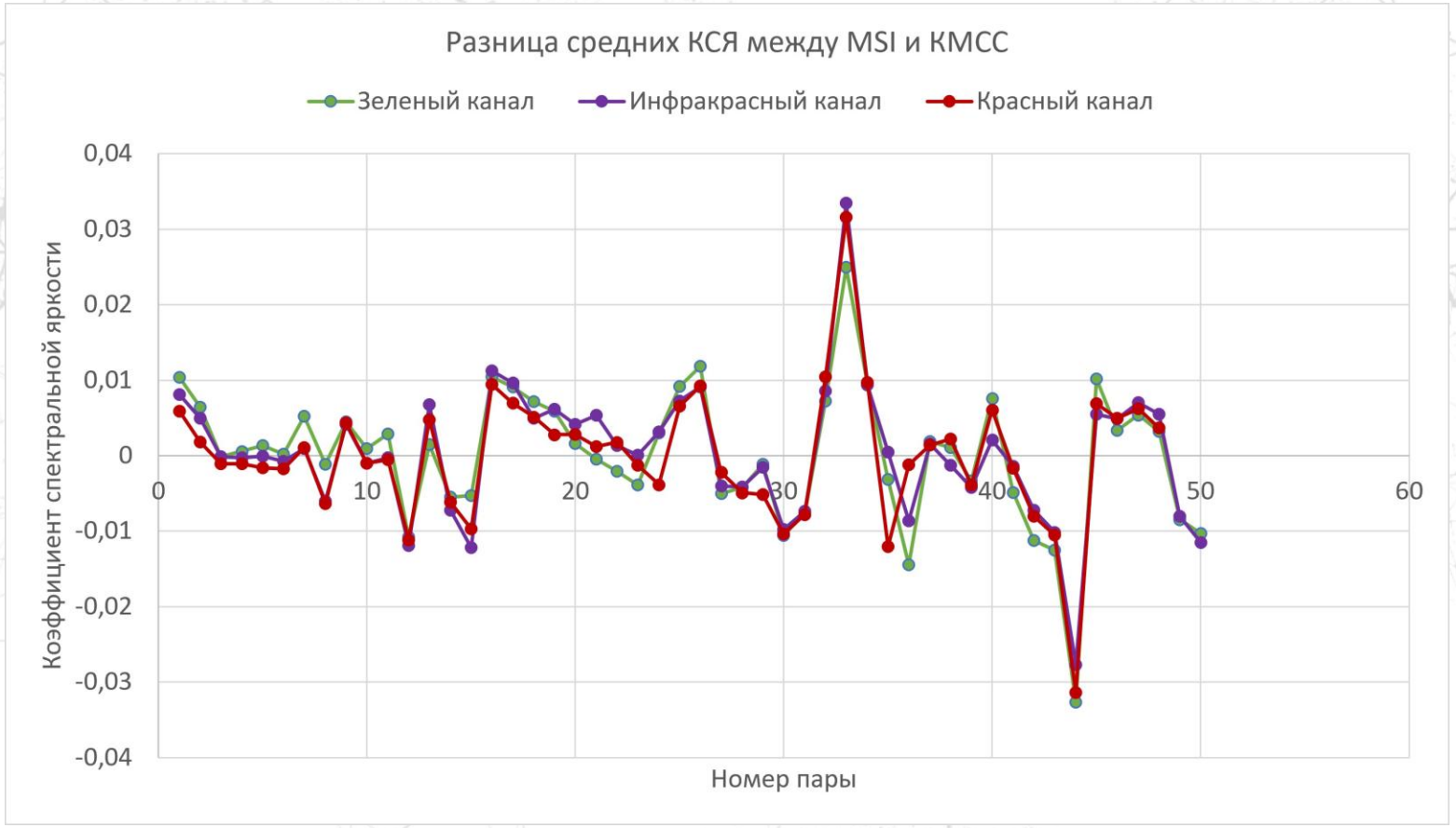
1. Маскирование облачности и пикселей на основе пороговых и адаптивных фильтров с использованием порядковых статистик
2. Выбор однородных участков методом скользящего окна на основе анализа коэффициента вариации
3. Оценка соответствия сопоставляемых пар окрестностей на основе корреляции Пирсона

Сравнение автоматической и интерактивной обработки



СКО: автомат – 0.0089, интерактив – 0.00913

Результаты гармонизации величин КСЯ съемочных систем КМСС и MSI на основе обработки данных за апрель-сентябрь 2025г.



Канал	Множитель	Смещение	СКО разницы КСЯ
Красный	0,0996	5,4	0,0088
Инфракарсный	0,0979	3,5	0,0089
Зеленый	0,0983	6,5	0,0088

Заключение

1. Проанализирована сопоставимость ФСЧ спектральных каналов КМСС Метеор-М №2-4 и MSI Sentinel-2. Показана высокая сопоставимость NIR-каналов, для каналов видимого диапазона наблюдается рассогласованность – в пределах 5% SBAF
2. Проанализирована применимость дву-точечной кросс-калибровки для гармонизации данных КМСС и MSI на основе съемки полигонов Такла-Макан и Средиземного моря. Наблюдается значительная изменчивость параметра сдвига
3. Предлагается новый алгоритм интегральной оценки параметров гармонизации на основе обработки всего множества наблюдений, дополнительно автоматизированный в части подготовки выборки данных. Показана надежность результатов обработки, включая сравнение с интерактивной схемой
4. С использованием экспериментальной методики выполнена обработка данных за период апрель-сентябрь 2025г. Рассчитаны устойчивые коэффициенты гармонизации данных КМСС и MSI для всех спектральных каналов. Полученные точности укладываются в стандарт CEOS – не более 0.01

РКС
РОССИЙСКИЕ КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Спасибо за внимание!