

Калибровка радиометра МТВЗА-ГЯ при отсутствии опорного горячего источника излучения

Работа выполнена в рамках государственного задания ИКИ РАН (тема «Мониторинг»).



1

Сазонов Д.С., Садовский И.Н.
Институт космических исследований (ИКИ РАН)

e-mail: sazonov_33m7@mail.ru

Четырнадцатая международная Школа-семинар
«Спутниковые методы и системы исследования Земли»
25 мая – 1 июня 2026 г. Таруса.

КАЛИБРОВКА РАДИОМЕТРА

Одним из важных этапов предобработки данных, поступающих со спутниковых радиометрических систем, является процедура калибровки.

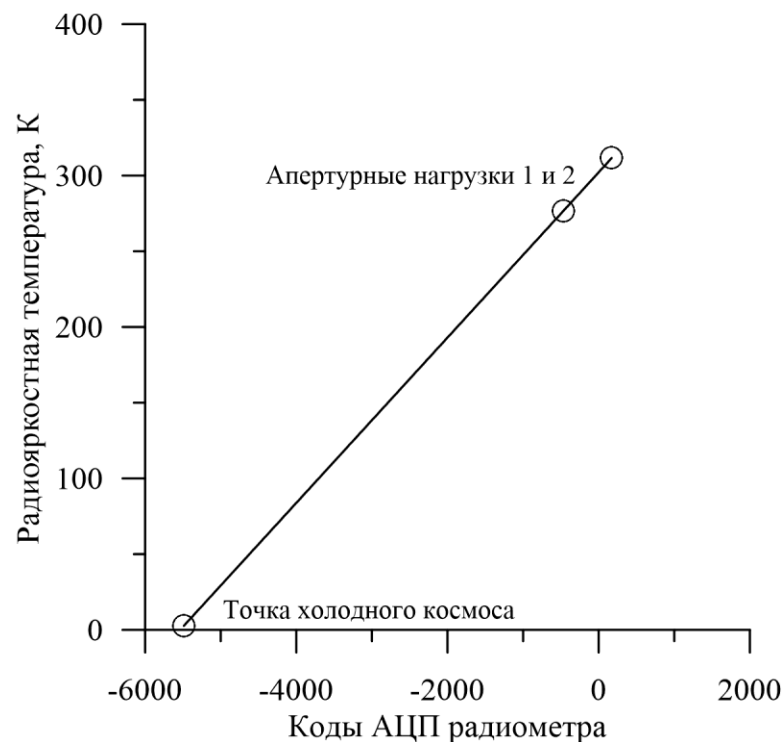
Калибровка радиометра — это процедура приведения его показаний к эталонным значениям. Она заключается в определении поправочных коэффициентов, связывающих сигнал с прибора (напряжение, ток, импульсы) с абсолютными физическими величинами излучения.

Цель процедуры — установить точное соответствие между сигналом на выходе прибора и реальной измеряемой величиной.

ЭТАПЫ КАЛИБРОВКИ

Процесс калибровки включает в себя несколько ключевых этапов:

- **Выбор эталона:** Прибор направляют на источник с известными и стабильными характеристиками (например, антенна, космическое пространство, калибровочные лампы или тестовые генераторы).
- **Сравнение:** Значения, зафиксированные радиометром, сопоставляются с эталонными данными.
- **Настройка:** На основе разницы (погрешности) вычисляются калибровочные коэффициенты (А, В). Они используются для пересчета "сырых" данных прибора в физические единицы (например, в Ватты на квадратный метр, вольты, или градусы Кельвина).



Пример
калибровочной прямой
 $y(x) = Ax + B$

КАЛИБРОВКА СПУТНИКОВОГО РАДИОМЕТРА

Виды калибровки:

➤ **Внутренняя:** Проводится автоматически с использованием собственных встроенных эталонов радиометра (часто применяется в спутниковых и сложных лабораторных приборах).

«Горячая» нагрузка: Бортовой имитатор абсолютно черного тела (АЧТ) с рабочей температурой $T = 250 - 300\text{K}$.

«Холодная» нагрузка: Открытый космос с фоновым микроволновым излучением, температура которого близка к рекордно низким значениям ($2,73\text{K}$).



Модуль температурного и влажностного зондирования атмосферы

КАЛИБРОВКА СПУТНИКОВОГО РАДИОМЕТРА

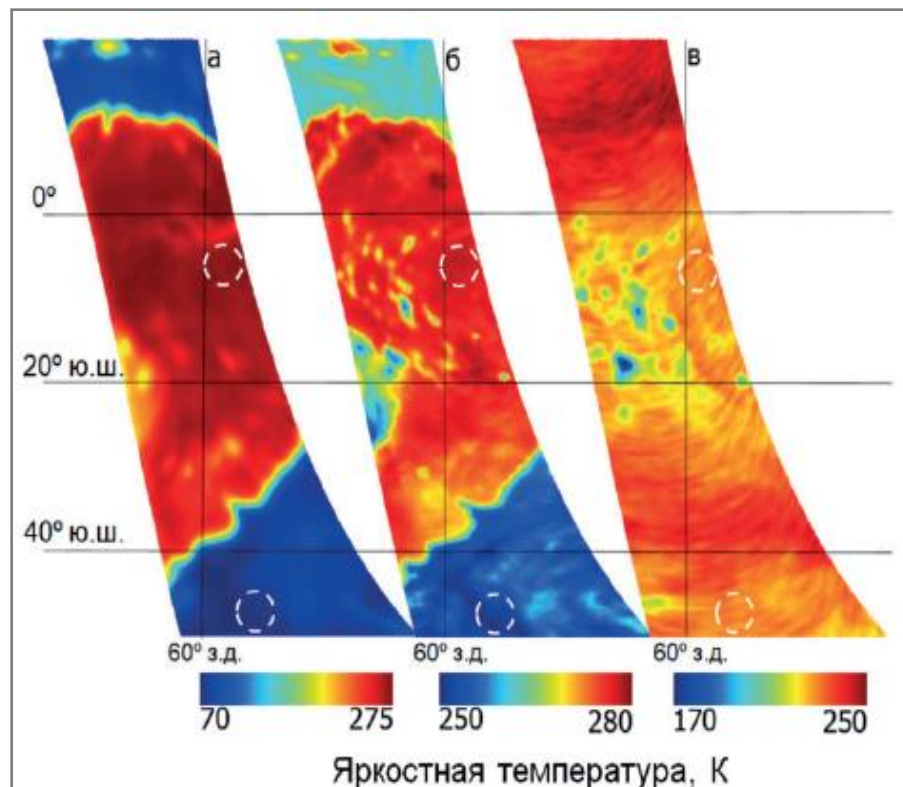
➤ Внешняя:

Требует направления прибора на реальные внешние источники излучения, параметры которых строго задокументированы.

Например для МТВЗА:

«холодными» участками могут быть области, где значения минимальны, они отмечаются над районами океана с температурой поверхности воды $\leq 12^{\circ}\text{C}$, слабым ветром (менее 2-3 м/с), отсутствием облаков и низкими значениями паросодержания атмосферы.

«горячими» участками выбираются области, где значения яркости максимальны и стабильны, это дождевые широколиственные леса бассейна Амазонки.



Пример выбора калибровочных областей для прибора МТВЗА-ГЯ. Показаны разные частотные каналы. Горизонтальная поляризация

УРАВНЕНИЕ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ

Для выполнения модельных расчетов излучения «горячей» и «холодной» области используется соотношение формирования и переноса излучения в системе «подстилающая поверхность – атмосфера»:

$$T_{Br}^{V,H}(\nu, \theta) = \chi^{V,H}(\nu, \theta) T_0 e^{-\tau(\nu) \sec(\theta)} + T_{Br}^{\uparrow}(\nu, \theta) + T_{Br}^{\downarrow}(\nu, \theta) [1 - \chi^{V,H}(\nu, \theta)] e^{-\tau(\nu) \sec(\theta)} + T_{cold} [1 - \chi^{V,H}(\nu, \theta)] e^{-2\tau(\nu) \sec(\theta)},$$

где:

$T_{Br}^{V,H}(\nu, \theta)$ – яркостная температура системы «подстилающая поверхность – атмосфера» на вертикальной (V) или горизонтальной (H) поляризации принимаемого излучения с частотой ν и углом встречи с Землей θ , регистрируемая прибором на орбите;

$\chi^{V,H}(\nu, \theta)$ – коэффициент излучения подстилающей поверхности;

T_0 – термодинамическая температура поверхности в градусах Кельвина;

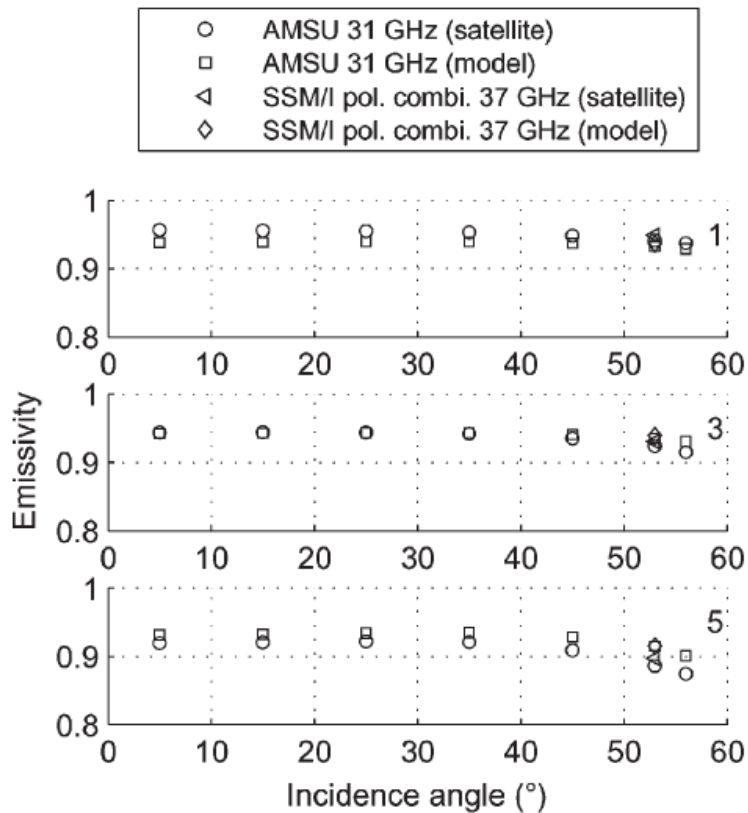
$\tau(\nu)$ – интегральное поглощение в атмосфере;

$T_{Br}^{\uparrow}(\nu, \theta)$ и $T_{Br}^{\downarrow}(\nu, \theta)$ – яркостная температура восходящего и нисходящего излучения атмосферы соответственно;

T_{cold} – яркостная температура космического излучения.

ПРОБЛЕМА

В указанной методике для расчета радиояркостной температуры для «горячей» опорной области используются коэффициенты излучений, такие же, как для прибора SSMIS, предполагая, что излучение практически не зависит от угла наблюдения.



В зарубежных работах есть исследование угловой зависимости излучательной способности поверхности суши. (1 – леса Амазонии; 5 - пустыня).

Однако, угол наблюдения ограничен 55 градусами.

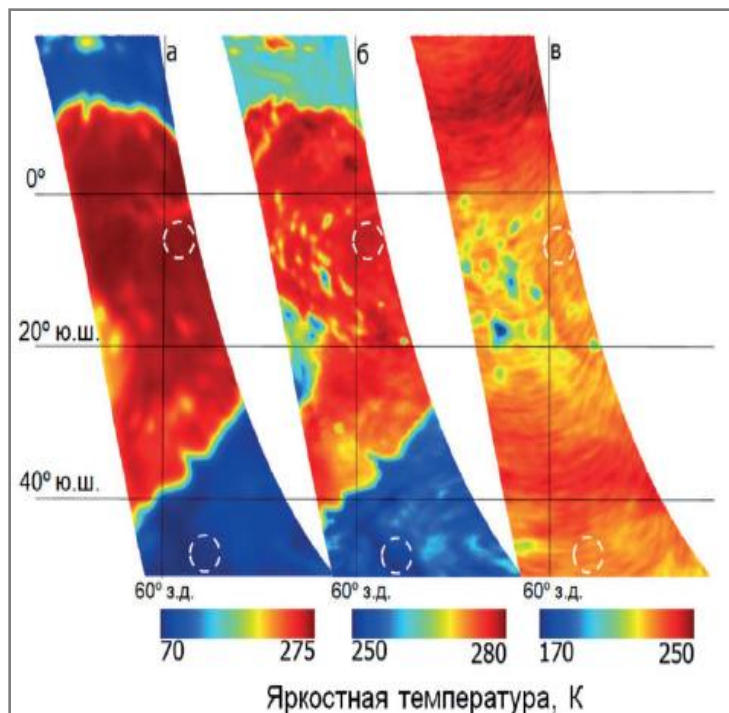
А каково значение для угла МТВЗА (65 градусов)?

Prigent C., Jaumouillé E., Chevallier F., Aires F. A parameterization of the microwave land surface emissivity between 19 and 100 GHz, anchored to satellite-derived estimates // IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing. 2008. V. 46. No. 2. P. 344–352.

ВОЗМОЖНЫЕ РЕШЕНИЯ

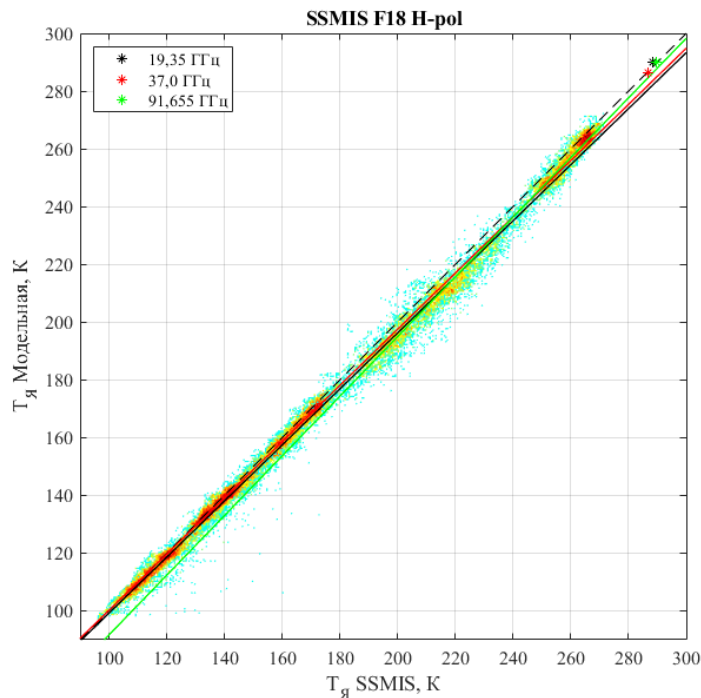
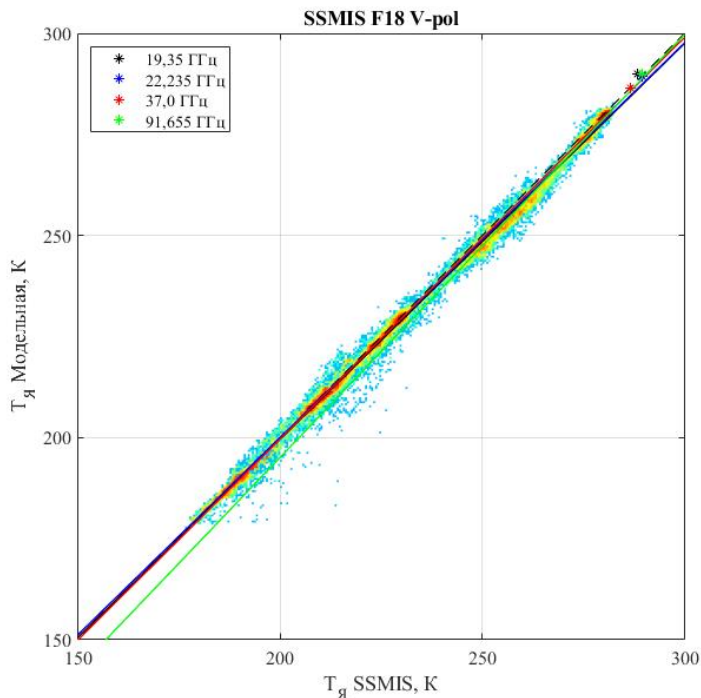
В идеальном случае, необходимо провести натурные многочастотные измерения коэффициента излучения суши на угле в 65 градусов, однако таких измерений нет.

Таким образом, в настоящее время есть сомнения в точности расчета калибровки для прибора МТВЗА-ГЯ.



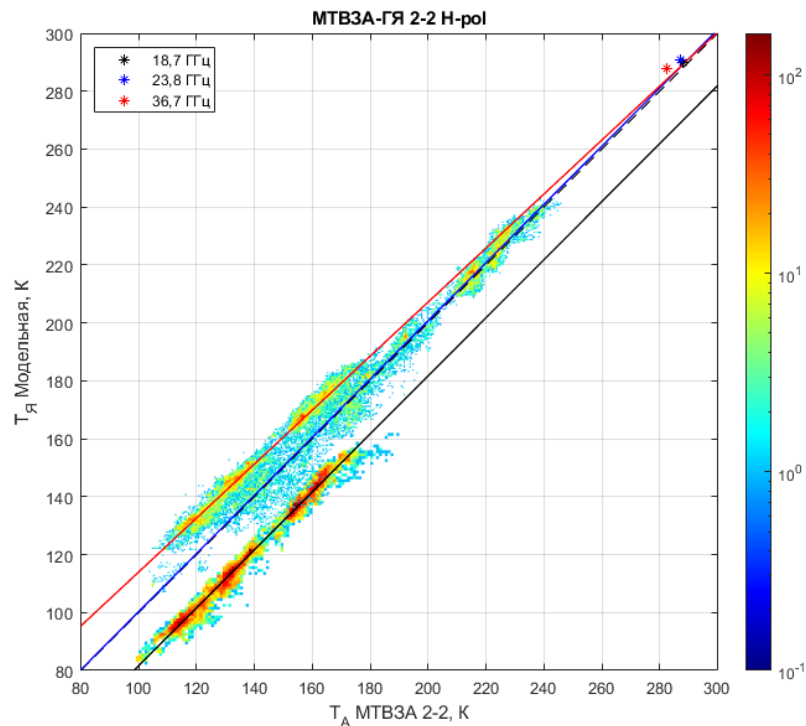
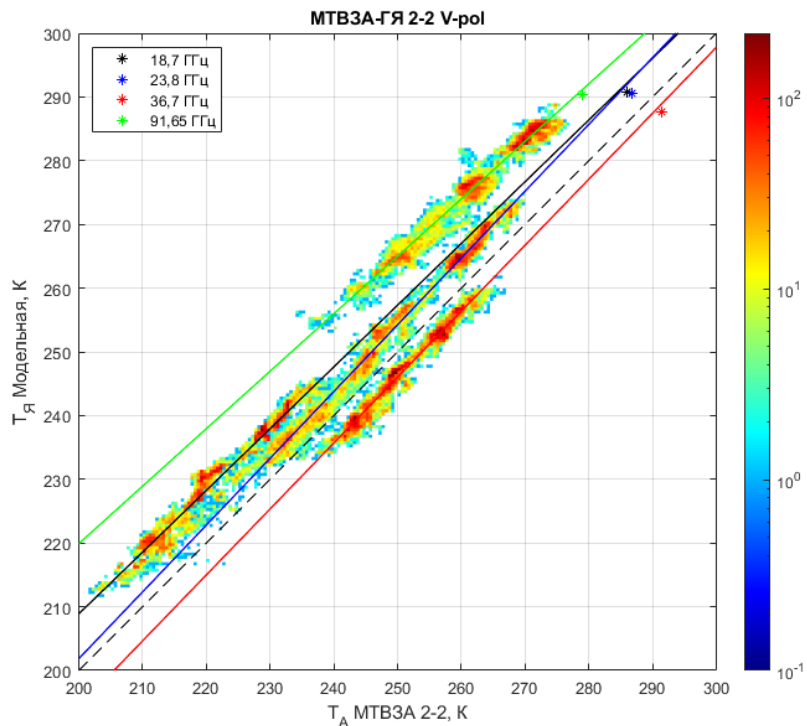
Предлагается выполнять расчет радиояркости для всех участков поверхности океана, в которых малая скорость ветра и свободная атмосфера. В указанной методике предполагается, что корреляция между рассчитанными по УПИ и измеренными радиояркостями будет линейной и перекроет практически половину диапазона возможных значений, тем самым обеспечит получение калибровочной прямой.

ПРОВЕРКА НА ДАННЫХ РАДИОМЕТРА SSMIS



На основе данных реанализа были отобраны области спокойной водной поверхности с безоблачной атмосферой. По ним выполнялся модельный расчет уходящего излучения и сравнивался с непосредственными спутниковыми измерениями. На данном слайде приведена диаграмма разброса соответствующих яркостей для приборов SSMIS. Мы видим, что наблюдается полное соответствие модели излучения и измерений, причем если аппроксимирующую прямую продолжить в область высоких значений яркости, то она попадает в точку горячей нагрузки, рассчитанную для лесов амазонки.

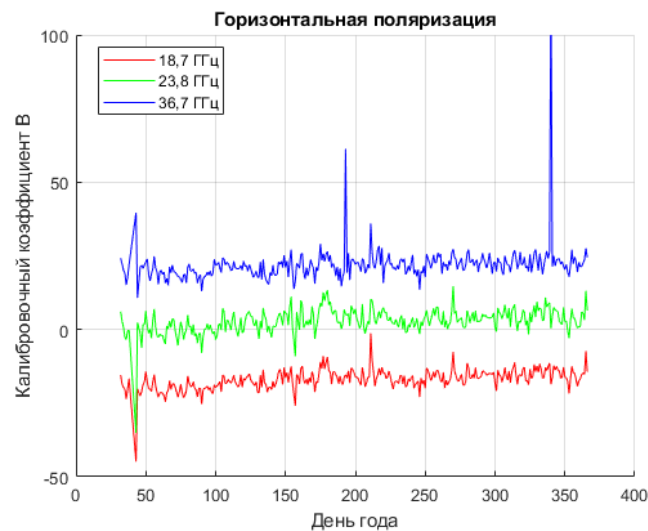
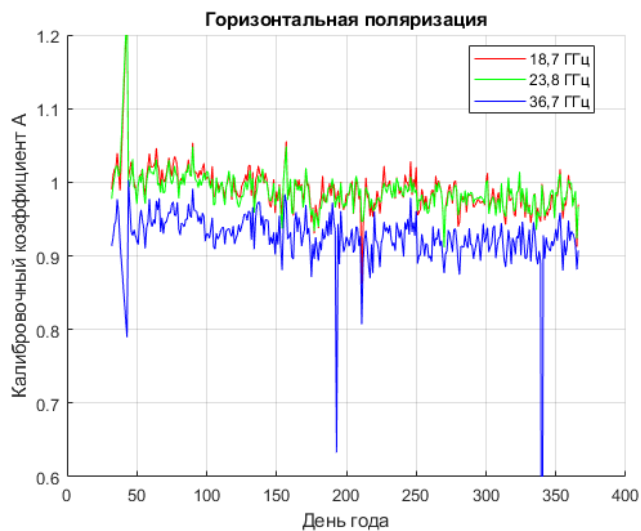
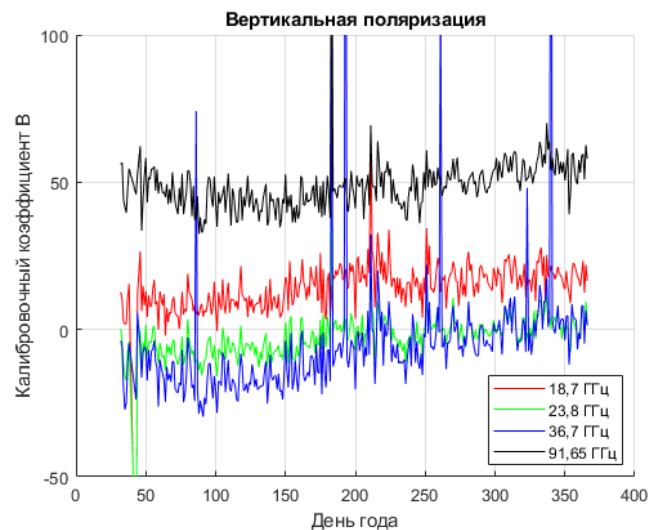
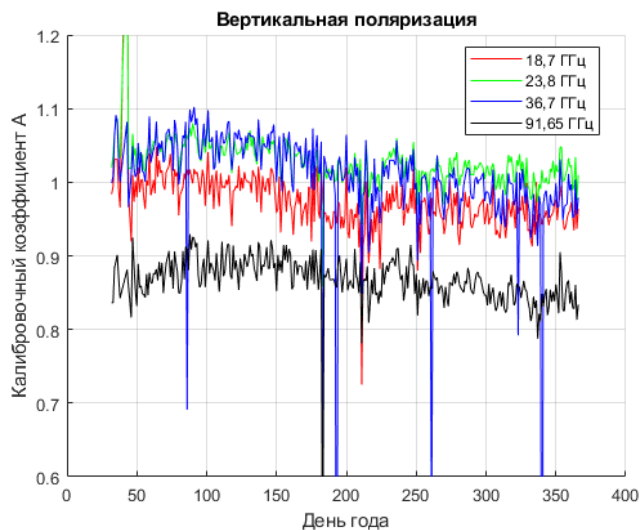
КАЛИБРОВКА МТВЗА-ГЯ



Аналогичный расчет для результатов измерений, выполняемых прибором МТВЗА-ГЯ.

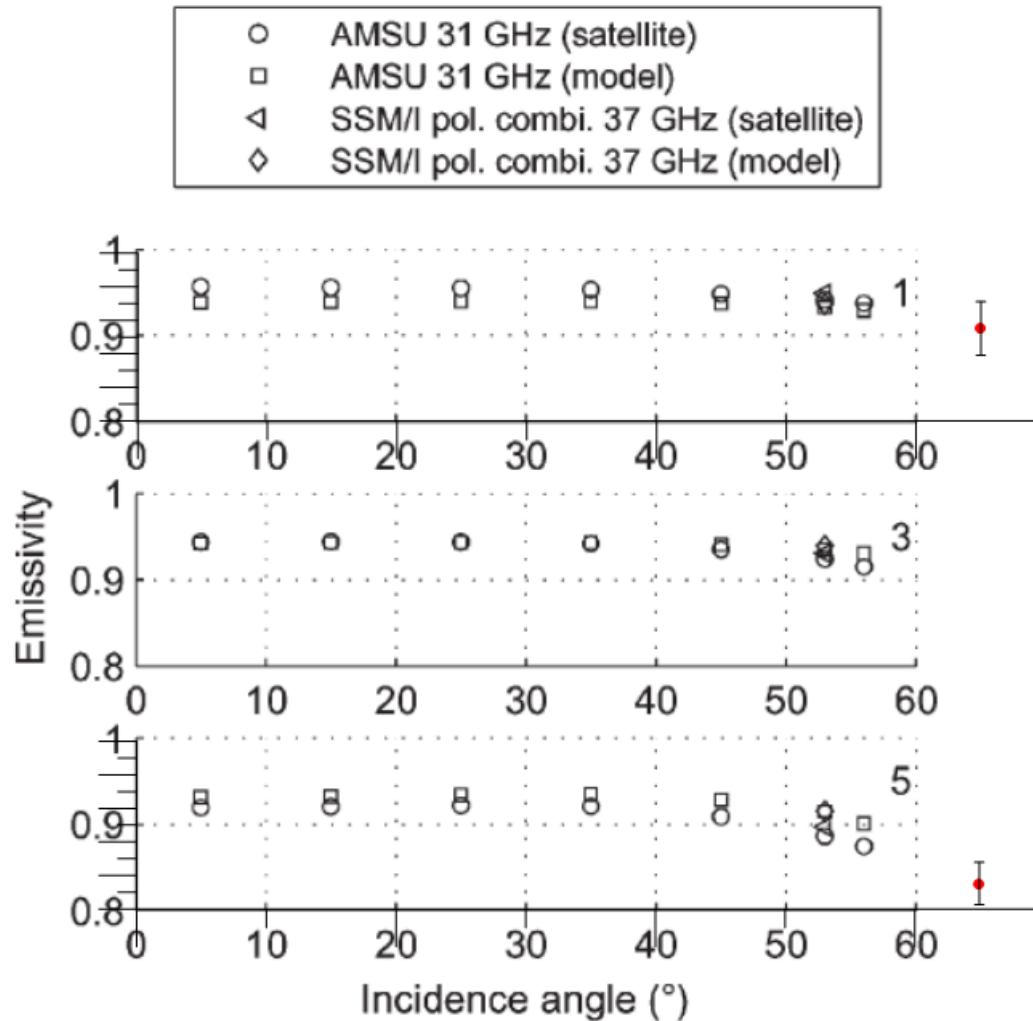
При этом для завершения калибровки у нас не хватает априорной информации о коэффициентах излучения горячих калибровочных полигонов, поскольку угол встречи с землей у МТВЗА-ГЯ составляет 65 градусов, а информация о частотной зависимости коэффициентов излучения лесов Амазонки, или пустыни Сахара, ограничивается исследованиями на углах 53 градуса.

КАЛИБРОВОЧНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ

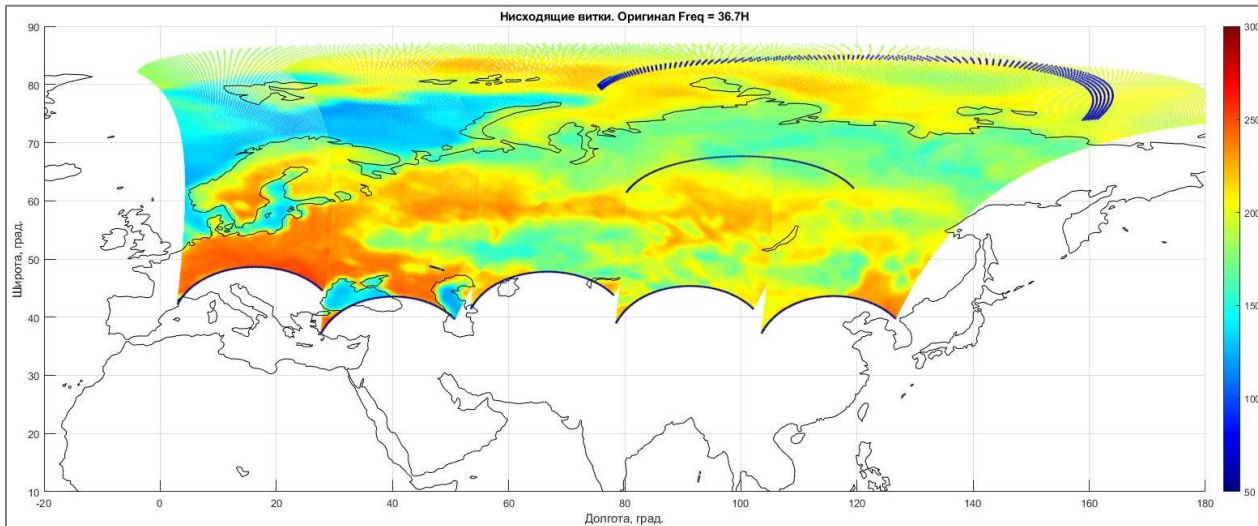
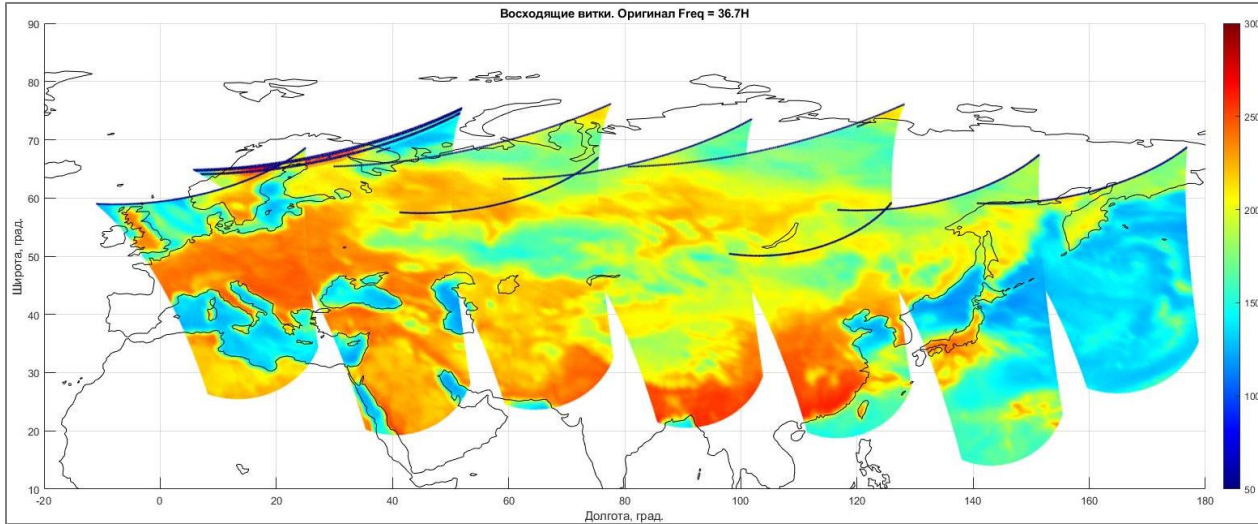


Результат калибровки за весь 2020 год.

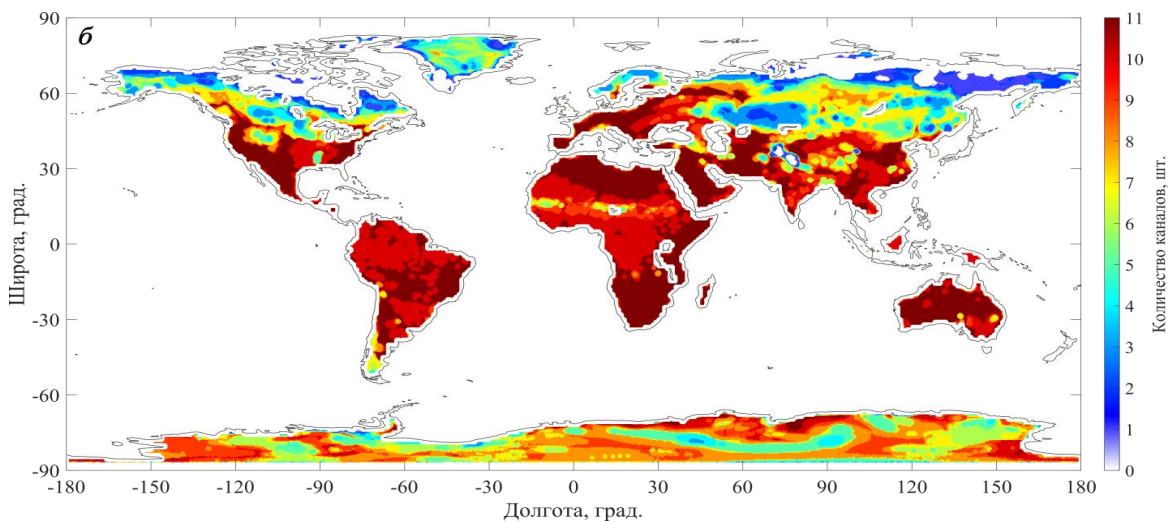
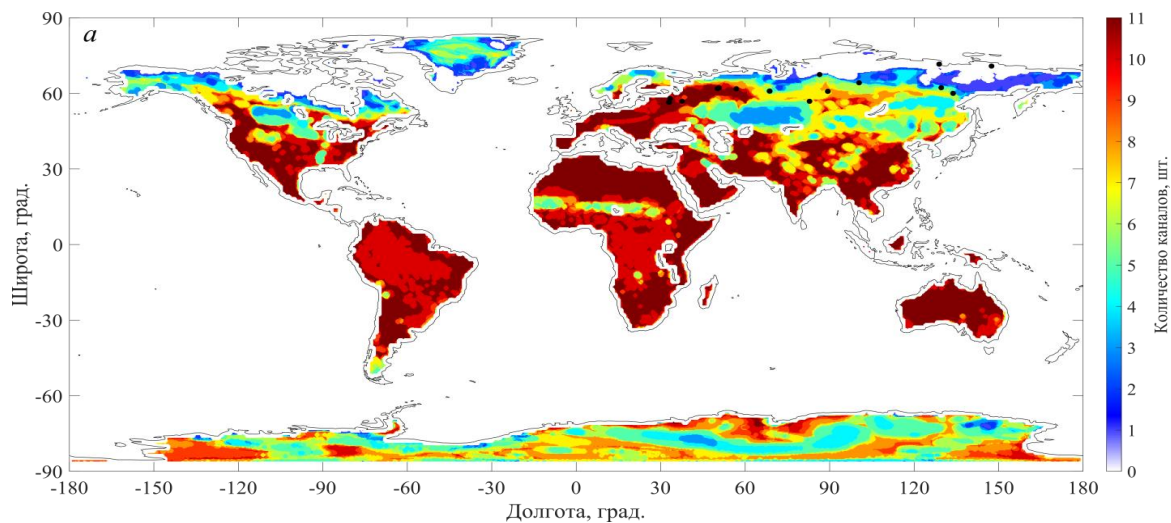
РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА ИЗЛУЧЕНИЯ СУШИ



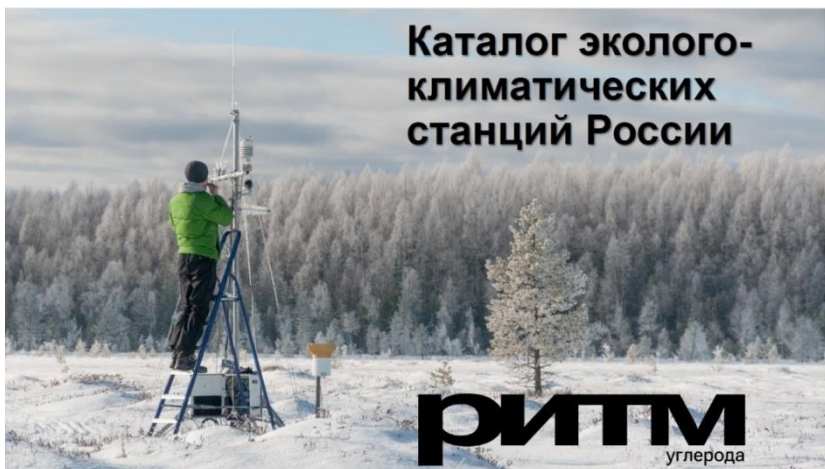
Оценка возможности использования отдельных территорий РФ для калибровки приборов серии МТВЗА (КА «Метеор - М» №2-3)



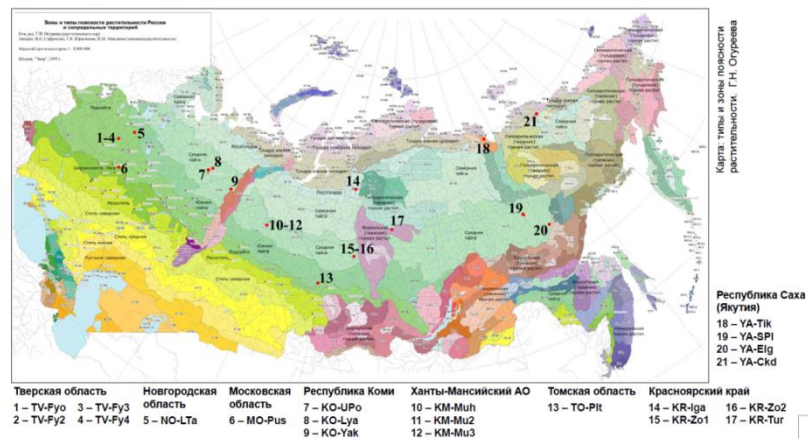
Оценка возможности использования отдельных территорий РФ для калибровки приборов серии МТВЗА (КА «Метеор - М» №2-3)



Оценка возможности использования отдельных территорий РФ для калибровки приборов серии МТВЗА (КА «Метеор - М» №2-3)



Карта и список станций в каталоге



РИТМ углерода

КАТАЛОГ ЭКОЛОГО-КЛИМАТИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

56° 26' 50.8" С.Ш. Абс. высота
32° 54' 07.7" В.Д. 263 м

ЮЖНАЯ ТАЙГА



ТВЕРСКАЯ ОБЛАСТЬ

Центрально-Лесной государственный природный биосферный заповедник Южно-Валдайская экологическая обсерватория «Оковский Лес» Деревня Большое Фёдоровское

Фёдоровское, ельник неморальный TV-Fy2

Экосистема

Ельник с примесью клена, осины, вяза и березы кислично-щитовниковый (ель: 53%, клен: 18%, вяз: 6%, осина: 6%, береза: 6%).
Высота древостоя: 30–35 м.
Возраст древостоя: до 170 лет. Бонитет I.

Климат

Температура января: -5.9°C. Температура июля: 18.2°C
Среднегодовая температура: 4.8°C
Среднегодовое количество осадков: 727 мм

Измерения

Период работы: 1999 г. – н.в. Высота вышки: 42 м
Мониторинг: потоки CO₂, CH₄, метеорологические параметры (круглогодично)

Основные публикации

Mamkin V. et al. Energy and CO₂ exchange in an undisturbed spruce forest and clear-cut in the Southern Taiga. Agric. For. Meteorol. 2019, 265, 252–268.
Mamkin V. et al. Response of Spruce Forest Ecosystem CO₂ Fluxes to Inter-Annual Climate Anomalies in the Southern Taiga. Forests 2022, 13(7), 1019.

Организация

Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, 119071, Москва, Ленинский проспект, д. 33

Контакты:

Варлагин Андрей Викторович
varlagin@sevin.ru



ВЫВОДЫ

- В представленной работе показана модифицированная методика проведения внешней калибровки. Работоспособность предлагаемого подхода проверена на данных прибора SSMIS F18. Результаты показали практически идеальное совпадение модельных расчетов с радиояркостными температурами SSMIS. Линейность аппроксимации по точкам модель-измерения и малый уровень ошибки при ее продлении в «горячую» область позволяют выполнить калибровку прибора без использования опорной «горячей» точки.
- Предложенная методика построения калибровочной прямой применена для калибровки прибора МТВЗА-ГЯ.
- Рассчитанные коэффициенты излучения для широколистных лесов Амазонки и пустыни Сахара дополняют, полученную другими исследованиями угловую зависимость.
- Для уточнения коэффициентов излучения поверхности суши предлагается рассмотреть возможность проведения дополнительных измерений на эколого-климатических станциях, входящих в программу РИТМ углерода, расположенных в Тверской области.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

