



Оценка дрейфа качества орбитальных измерений метана AIRS v6, v7 и применение методики коррекции к долговременным спутниковым рядам

***E. И. Фёдорова, В. С. Ракитин, А. В. Казаков, Н. С. Кириллова,
Н. Ф. Еланский***

E-mail: vadim@ifaran.ru

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

**XXIII международная конференция "СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА"**

Москва, 11 ноября 2025 г.

Орбитальные спектрометры

Т.н. «долголетающие» (более 15 лет) системы:

MODIS/Terra/Aqua:

AOD, O₃, облачность



AIRS/Aqua:

CO, CH₄, O₃, метео



OMI/Aura:

содержание NO₂, O₃



Приборы старшего поколения незаменимы при оценке региональных и глобальных долговременных изменений состава атмосферы, в особенности в районах земного шара, не охваченных наземными сетями мониторинга.

Спектрометр AIRS [Aumann et al., 2003] записывает спектры поглощения собственного инфракрасного излучения Земли в спектральном диапазоне от 3.75 до 15.4 мкм. Полоса захвата сканера составляет 800 км по обе стороны от наземной траектории, что позволяет охватить измерениями более 80% поверхности Земли. Спутник покрывает поверхность земного шара в диапазоне -180° до +180° восточной долготы и -90° до +90° северной широты.

В процессе длительного функционирования качество орбитальных данных может ухудшаться, что косвенно подтверждается расхождением оценок трендов состава атмосферы, получаемым по спутниковым и наземным данным [Zou, 2019; Rakitin et al., 2020]

Цели и задачи исследования

- **Оценка качества** измерений общего содержания (ОС) метана и оксида углерода спутниковым прибором AIRS v6, v7 (Atmospheric InfraRed Sounder version 6 & 7, вид данных IR AIRS Only [AIRS/AMSU/HSB, 2017; 2020]) и **валидация** высокоточными данными 18 наземных станций мониторинговой сети NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change [De Mazere et al., 2018]), период с 2003 по 2022 г.
- Обнаружение возможного дрейфа параметров спутникового прибора
- Разработка методики коррекции долговременных орбитальных рядов
- Оценка эффективности разработанной методики на примере сопоставления характеристик соответствия спутниковых данных наземным измерениям и оценок трендов состава атмосферы на примере метана

Ракитин В.С., Фёдорова Е.И., Кириллова Н.С., Панкратова Н.В., Еланский Н.Ф. Оценка дрейфа качества орбитальных наблюдений и применение методов коррекции к долговременным рядам на примере измерений общего содержания метана с помощью спутникового прибора AIRS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. т.21. №6. с. 33-47

Параметр	Спутниковый продукт	Переменная для извлечения
ОС CH_4	AIRS Standard L3 v.6/v7 IR AIRS Only Daily	V6: TotCH4_A * Общее содержание в столбе CH_4 [молек/см²] V7: VMR_CH4_A, объемная концентрация на 24 уровнях [ppbv] Разрешение $1^\circ \times 1^\circ$,
ОС CO	Standard L3 v6 IR AIRS Only Daily	TotCO_A Общее содержание в столбе CO Разрешение $1^\circ \times 1^\circ$, [молек/см²]
Altitude	—	Topography. Разрешение $1^\circ \times 1^\circ$, [метры над у.м.]

Синхронизация орбитальных (AIRS) и наземных (GR) рядов: только дневные парные значения AIRS/GR, все доступные периоды для 18 точек, соответствующих расположению пунктов измерений сети атмосферного мониторинга Network for the Detection of Atmospheric Composition Change (NDACC). Координаты каждого наземного пункта являются центром ячейки спутниковых измерений $1^\circ \times 1^\circ$.

Расположение наземных спектрометров NDACC



Сведения о пунктах измерений NDACC [De Mazere et al., 2018]

№	Пункт	Шир./Долг., °	Выс. н.у.м., м	Коэф. у.м*	Период	Примесь, ОС
1	Eureka	80.0N/86.4W	610	0.926	2006-2020	CH ₄ /CO
2	Ny Alesund	78.9N/11.9E	15	0.998	2003-2022	CH ₄ /CO
3	Thule,	76.5N/68.7W	220	0.973	2003-2022	CH ₄ /CO
4	Kiruna	67.8N/20.4E	419	0.949	2003-2022	CH ₄ /CO
5	Harestua	60.2N/10.8E	596	0.928	2009-2020 2003-2018	CH ₄ CO
6	Saint-Petersburg	59.9N/29.8E	20	0.997	2009-2022	CH ₄ /CO
7	Bremen	53.1N/8.8E	27	0.997	2004-2022	CH ₄ /CO
8	Zugspitze	47.4N/11.0E	2964	0.690	2003-2022	CH ₄ /CO
9	Jungfraujoch	46.5N/8.0E	3580	0.638	2003-2022	CH ₄ /CO
10	Toronto – TAO*	43.7N/79.4W	174	0.978	2003-2019* 2003-2022	CH ₄ CO
11	Rikubetsu	43.5N/143.8E	380	0.953	2003-2019 2003-2018	CH ₄ CO
12	Izana, Tenerife	28.3N/16.5W	2367	0.743	2003-2022	CH ₄ /CO
13	Mauna Loa	19.5N/155.9W	3397	0.653	2003-2022	CH ₄ /CO
14	Paramaribo	5.7N/55.2W	23	0.997	2004-2022 2004-2018	CH ₄ CO
15	Reunion Maido	21.1S/55.4E	2155	0.763	2013-2019	CH ₄ /CO
16	Wollongong	34.4S/150.9E	30	0.996	2003-2022	CH ₄ /CO
17	Lauder	45.0S/169.7E	370	0.955	2003-2021	CH ₄ /CO
18	Arrival Heights	77.8S/166.7E	184	0.977	2003-2022	CH ₄ /CO

*коэффициент рассчитан посредством применения барометрической формулы [Хргиан, 1969]

**«ступенька» (сдвиг) наземных данных ОС CH₄ после 2019 г.

Приведение данных NDACC к уровню моря

С использованием информации о высоте станции, были определены коэффициенты пересчета данных к уровню моря, рассчитанные по барометрической формуле (БФ) [Хргиан, 1969]:

$$C = \frac{P}{P_0} \quad (1).$$
 где:

P – атмосферное давление на уровне станции, мбар

P₀ – атмосферное давление на уровне моря, 1013 мбар

Давление на уровне станции рассчитывается следующим образом:

$$P = P_0 \times \exp \left[-Mg \frac{h-h_0}{kT} \right]. \quad \text{где:}$$

P – давление в слое заданной высоты h

h-h₀ – разность высот, равная h при расчёте для уровня моря. м

P₀ – давление на уровне моря

k – универсальная газовая постоянная

T – абсолютная температура в градусах Кельвина

M – молярная масса воздуха

g – ускорение свободного падения.

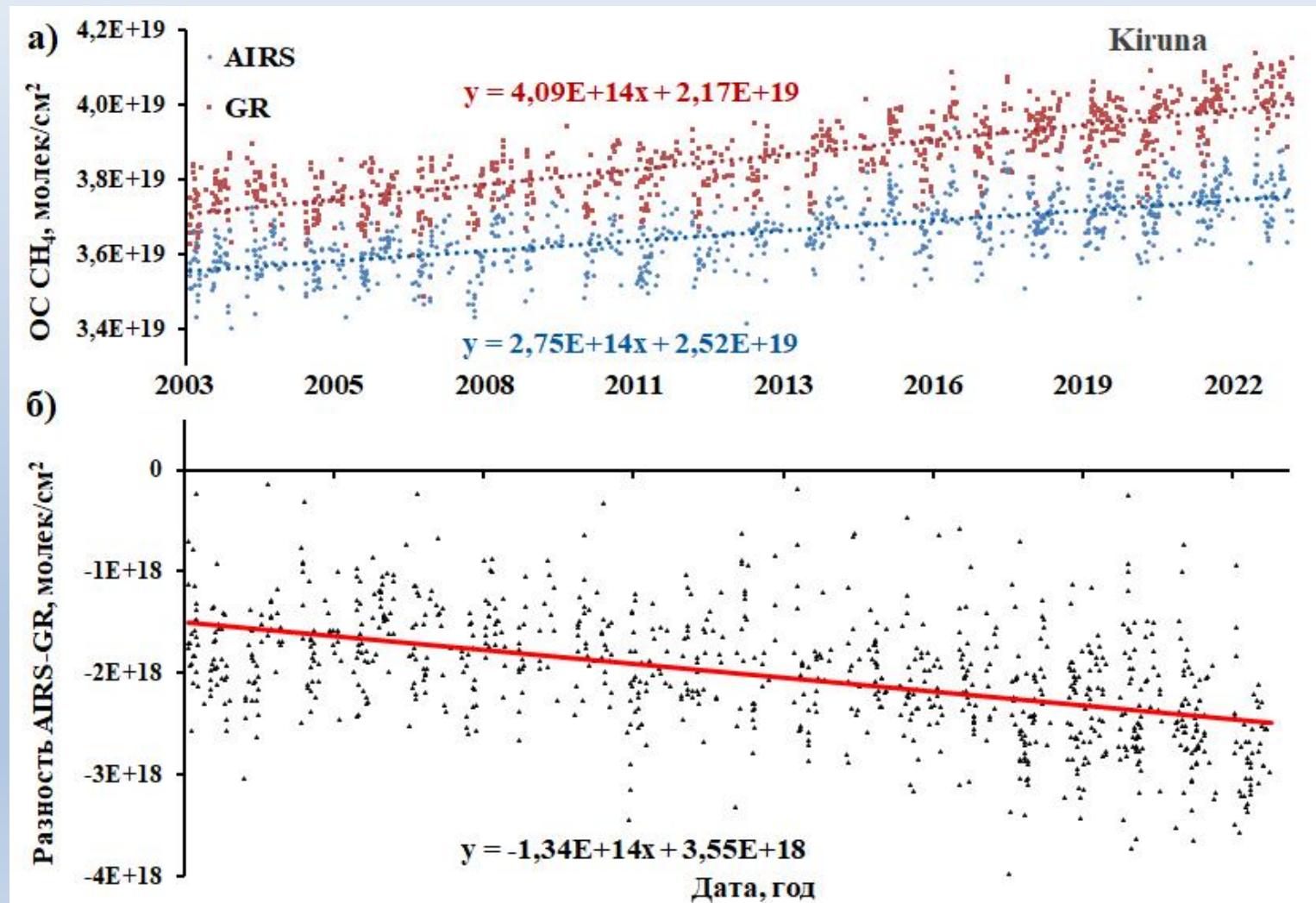
Таким образом коэффициент перевода значения общего содержания в столбе к уровню моря равен:

$$C = \exp \left[-Mg \frac{h-h_0}{kT} \right].$$

В случае использования измеренного на станции давления (среднее собственное давление, или ССД) используется формула 1.

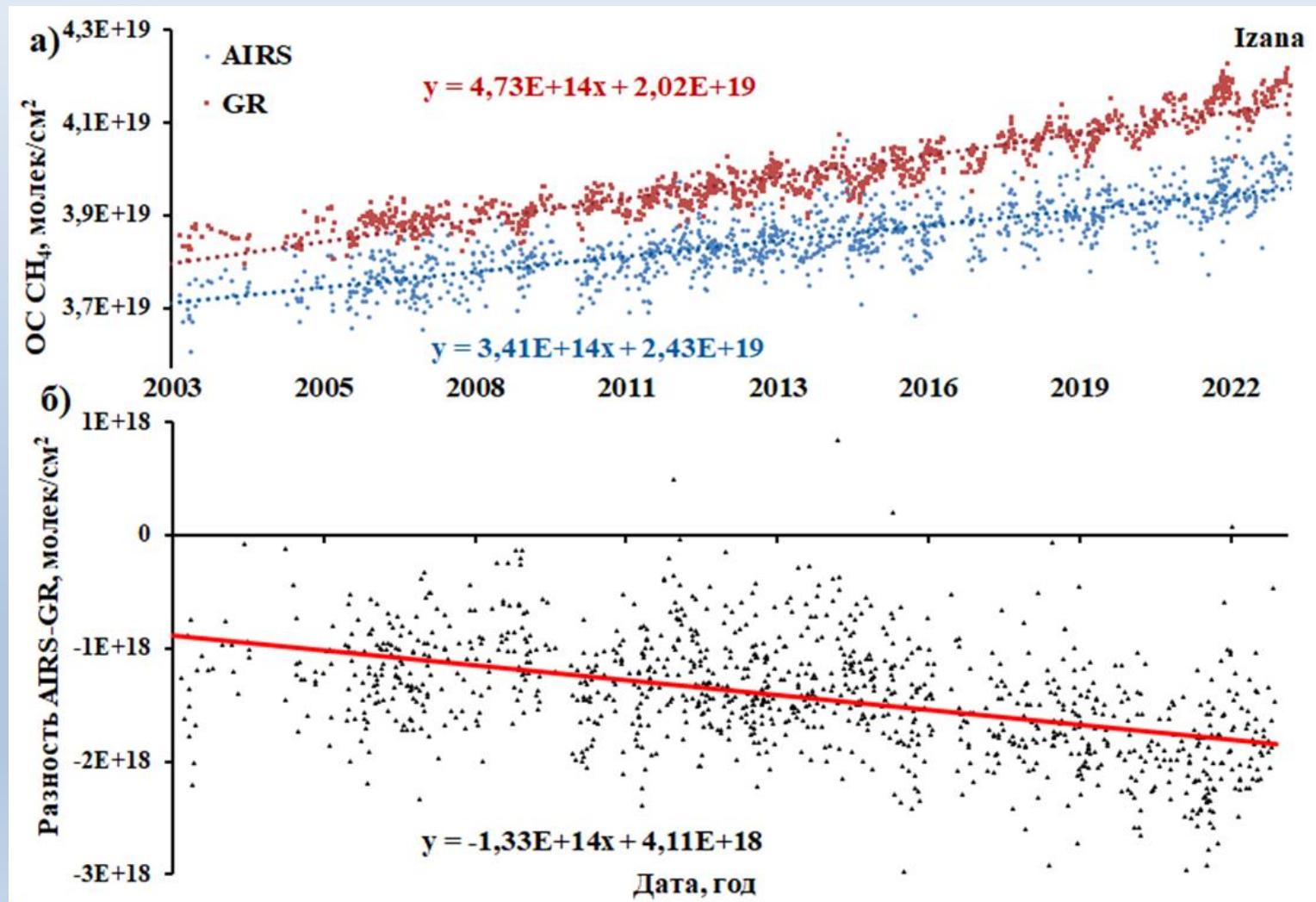
AIRS v6. Определение спутникового дрейфа «невязки» ОС CH₄

Установлены значимые изменения параметров соответствия орбитальных данных ОС CH₄ AIRS Standard L3 v.6 IR AIRS Only Daily наземным наблюдениям станций NDACC. Тренд «невязки» оказался отрицателен на всех исследуемых пунктах и определен как долговременной дрейф параметров спутникового прибора.



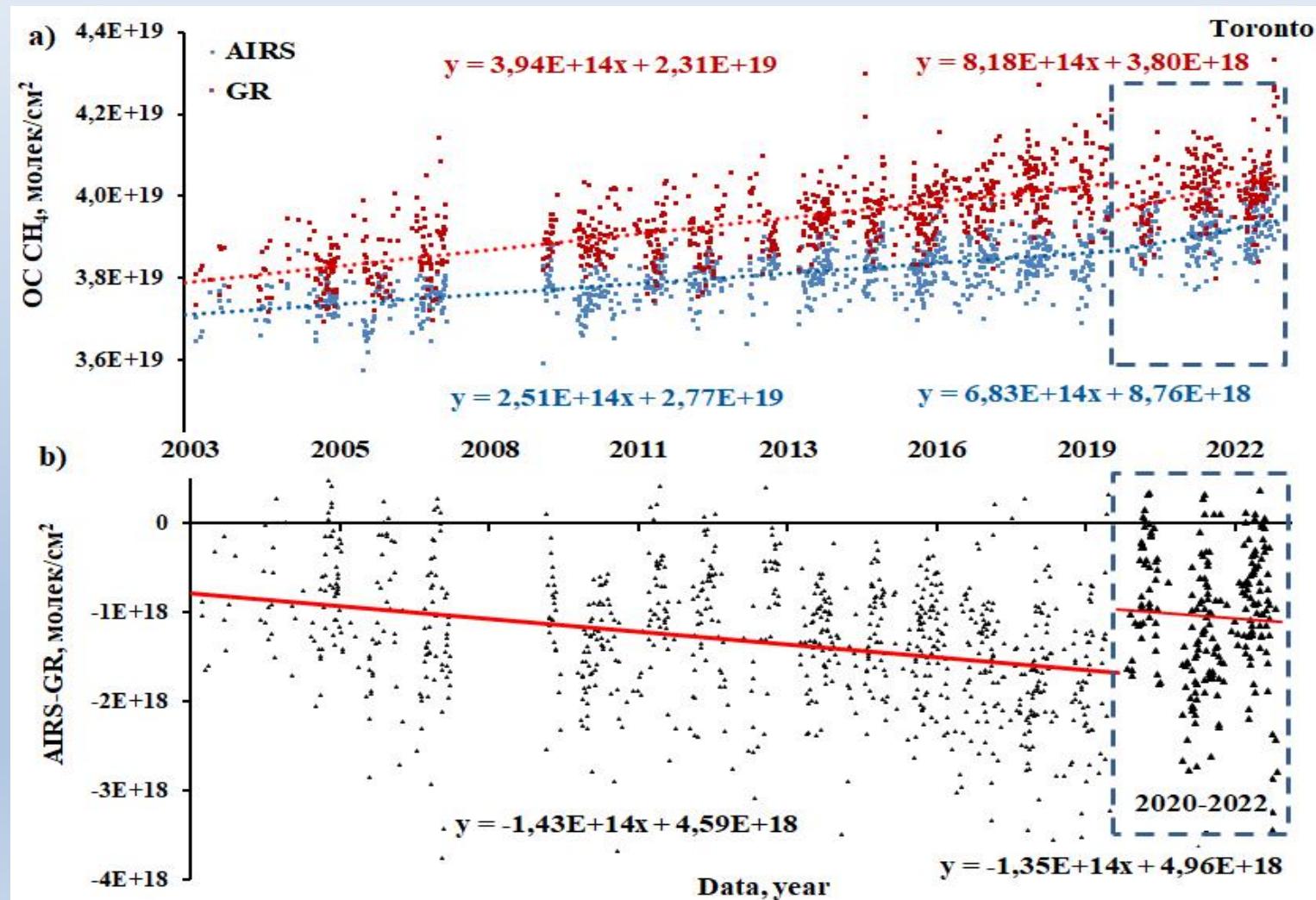
AIRS v6. Определение спутникового дрейфа «невязки» ОС CH₄

Установлены значимые изменения параметров соответствия орбитальных данных ОС CH₄ AIRS Standard L3 v.6 IR AIRS Only Daily наземным наблюдениям станций NDACC. Тренд «невязки» оказался отрицателен на всех исследуемых пунктах и определен как долговременной дрейф параметров спутникового прибора.



AIRS v6. Определение спутникового дрейфа «невязки» ОС CH₄

Установлены значимые изменения параметров соответствия орбитальных данных ОС CH₄ AIRS Standard L3 v.6 IR AIRS Only Daily наземным наблюдениям станций NDACC. Тренд «невязки» оказался отрицателен на всех исследуемых пунктах и определен как долговременной дрейф параметров спутникового прибора.



AIRS v6. Спутниковый дрейф «невязки» для ОС CH₄

(барометрическая формула)

Satellite spectrometer drift (SSD) = -1.69×10^{14} молек/см² в сутки

Пункт измерений	Наклон тренда разности. молек/см ² в сутки	N (число пар)
Eureka	$-2.02 \times 10^{14} \pm 2.86 \times 10^{13}$	810
Ny Alesund	$-1.74 \times 10^{14} \pm 2.98 \times 10^{13}$	412
Thule	$-1.07 \times 10^{14} \pm 2.02 \times 10^{13}$	1027
Kiruna	$-1.34 \times 10^{14} \pm 1.54 \times 10^{13}$	907
Harestua	$-1.98 \times 10^{14} \pm 4.64 \times 10^{13}$	463
Saint Petersburg	$-2.18 \times 10^{14} \pm 3.02 \times 10^{13}$	859
Bremen	$-2.18 \times 10^{14} \pm 3.30 \times 10^{13}$	404
Zugspitze	$-1.75 \times 10^{14} \pm 2.76 \times 10^{13}$	1721
Jungfraujoch	$-1.40 \times 10^{14} \pm 3.27 \times 10^{13}$	1441
Toronto**	$-1.43 \times 10^{14} \pm 2.96 \times 10^{13}$	863
Izana	$-1.33 \times 10^{14} \pm 1.48 \times 10^{13}$	1081
Mauna Loa	$-2.11 \times 10^{14} \pm 4.63 \times 10^{13}$	1079
Reunion Maido Maido	$-2.54 \times 10^{14} \pm 5.64 \times 10^{13}$	542
Wollongong	$-8.13 \times 10^{14} \pm 1.67 \times 10^{13}$	1963
Lauder	$-1.37 \times 10^{14} \pm 1.81 \times 10^{13}$	1578
Arrival Heights	$-1.49 \times 10^{14} \pm 5.06 \times 10^{13}$	492
СРЕДНЕЕ	$-1.69 \times 10^{14} \pm 3.10 \times 10^{13}$	

Коррекция AIRS v6

Satellite spectrometer drift (SSD) = -1.69×10^{14} молек/см² в сутки (БФ)
и SSD = -1.64×10^{14} молек/см² в сутки (ССД)

Коррекция рядов AIRS осуществлялась посменно:

$$\text{ОС } \text{CH}_4 \text{ SSD} = \text{ОС } \text{CH}_4 + (N-1) \times \text{SSD},$$

где:

ОС CH_4 SSD – скорректированное посменное спутниковое значение ОС CH_4 , [молек/см²]

ОС CH_4 – общее содержание CH_4 [молек /см²] по данным AIRS V6 L3

N – порядковый номер дня, начиная с 01.01.2003

SSD – коэффициент дрейфа

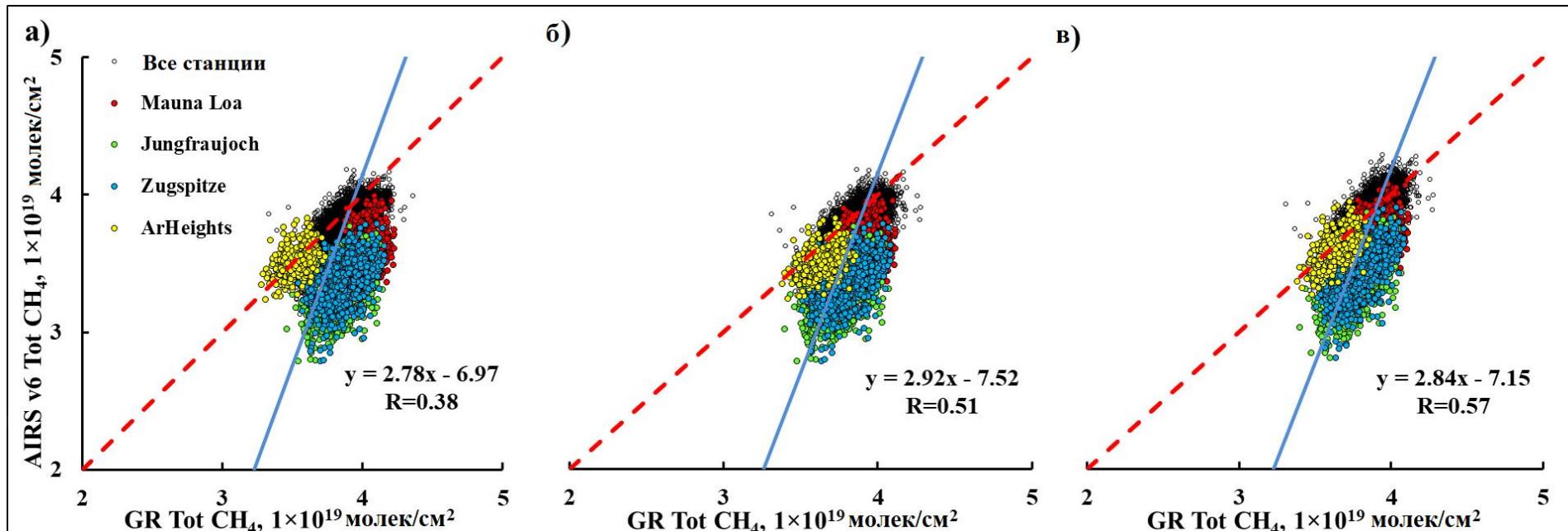
**Параметры корреляции AIRSv6/GR по ОС CH_4 :
барометрическая формула (БФ) и собственное
(измеренное) среднее давление (ССД)**

Пункт	Исходные ряды, R	После коррекции, R
Eureka	0.62	0.72
Ny Alesund	0.74	0.83
Thule	0.66	0.76
Kiruna	0.84	0.90
Harestua	0.68	0.74
Saint Petersburg	0.69	0.78
Bremen	0.77	0.84
Zugspitze	0.48	0.61
Jungfraujoch	0.46	0.58
Toronto	0.58	0.67
Rikubetsu	0.61	0.67
Izana	0.83	0.90
Mauna Loa	0.36	0.49
Paranaribo	0.60	0.69
Reunion Maido	0.46	0.59
Wollongong	0.69	0.78
Lauder	0.65	0.77
Arrival Heights	0.38	0.53

Параметры корреляции AIRSv6/GR по ОС CH₄: барометрическая формула (БФ) и собственное (измеренное) среднее давление (ССД)

Корреляция общего массива спутниковых и наземных измерений ОС CH₄

а) БФ, до коррекции; б) БФ, после коррекции; в) ССД, после коррекции



Параметры корреляции для высокогорных станций

Для расположенных выше 1000 м н.у.м. пунктов измерений спутник неверно определяет высотность.

Izana & Reunion Maido. Высота ячейки $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ оценена спутником близкой к 0 м н.у.м. Данные ложатся в общий массив с другими пунктами измерений.

Корреляция в массиве:

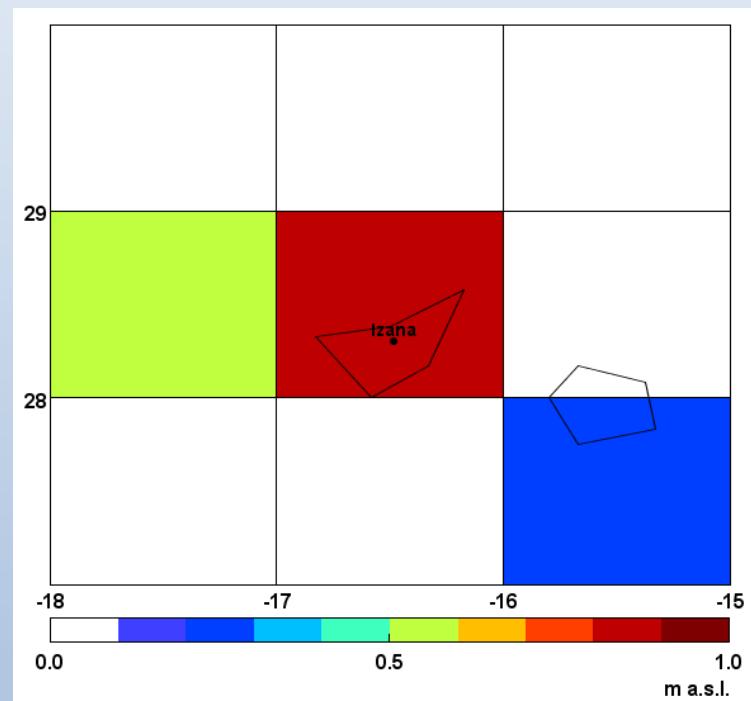
- до коррекции $R = 0.71$
- после коррекции $R = 0.76$

Zugspitze, Jungfraujoch, Mauna Loa

Недооценка высоты. Формируется отдельный массив. КК:

- до коррекции $R = 0.62$
- после коррекции $R = 0.71$

Пункт	Факт. высота н.у.м., м	Высота AIRS, м н.у.м.
Zugspitze	2964	1264
Jungfraujoch	3580	1551
Mauna Loa	3397	1301
Reunion Maido	2155	0
Izana	2367	1



Пункт Izana.
Переменная «topography» AIRS

AIRS v6. Тренды ОС CH₄. Использовано ССД

Пункт	Исходный тренд, %/год			Тренд после коррекции, %/год	
	AIRS	GR	AIRS-GR	AIRS	AIRS-GR
Eureka	0.14±0.03	0.33±0.03	-0.19	0.29±0.03	-0.04
Ny Alesund	0.27±0.03	0.43±0.03	-0.16	0.41±0.03	-0.02
Thule	0.21±0.02	0.31±0.02	-0.10	0.37±0.02	0.06
Kiruna	0.27±0.02	0.39±0.02	-0.12	0.43±0.02	0.04
Harestua	0.28±0.05	0.46±0.05	-0.18	0.43±0.04	-0.03
Saint Petersburg	0.28±0.03	0.48±0.03	-0.20	0.43±0.03	-0.05
Bremen	0.29±0.03	0.49±0.03	-0.20	0.43±0.03	-0.06
Zugspitze	0.29±0.03	0.42±0.01	-0.13	0.46±0.03	0.04
Jungfraujoch	0.33±0.03	0.41±0.02	-0.08	0.50±0.03	0.09
Toronto	0.24±0.02	0.37±0.03	-0.13	0.39±0.02	0.02
Rikubetsu	0.27±0.04	0.26±0.03	0.01	0.43±0.04	0.17
Izana	0.32±0.01	0.43±0.01	-0.11	0.47±0.01	0.04
Mauna Loa	0.30±0.05	0.45±0.02	-0.15	0.46±0.04	0.01
Paranaribo	0.20±0.03	0.34±0.06	-0.14	0.35±0.03	0.01
Reunion Maido	0.28±0.05	0.50±0.02	-0.22	0.43±0.05	-0.07
Wollongong	0.33±0.02	0.39±0.01	-0.06	0.48±0.02	0.09
Lauder	0.24±0.02	0.36±0.01	-0.11	0.41±0.02	0.05
Arrival Heights	0.25±0.05	0.40±0.03	-0.15	0.41±0.05	0.01
Среднее	0.27±0.03	0.40±0.02	-0.13	0.42±0.03	0.02

**AIRSv7, X[CH₄]: также, как для v6, обнаружен
однонаправленный статистически значимый дрейф невязки
SSD = -7.20×10⁻⁶ ppm/день (-1.55×10¹⁴ молек/см²/день)**

Пункт	AIRS v6 ОС CH ₄		AIRS v7 X[CH ₄]			
	Исходные	Коррекция	Исходн. данные		Коррекция	
			R	R	Опт. регресс.	R
Eureka	0.62	0.72	0.38	y=0.37x+1.10	0.49	y=0.66x+0.63
NY Alesund	0.74	0.83	0.71	y=0.60x+0.72	0.78	y=0.92x+0.18
Thule	0.66	0.76	0.55	y=0.67x+0.60	0.66	y=1.07x-0.07
Kiruna	0.84	0.90	0.77	y=0.68x+0.58	0.81	y=0.99x+0.05
Harestua	0.68	0.74	0.57	y=0.51x+0.89	0.63	y=0.73x+0.52
SPB	0.69	0.78	0.70	y=0.70x+0.55	0.77	y=0.92x+0.19
Bremen	0.77	0.84	0.74	y=0.56x+0.78	0.81	y=0.82x+0.34
Zugspitze	0.48	0.61	0.76	y=0.65x+0.65	0.81	y=0.94x+0.17
Jungfraujoch	0.46	0.58	0.77	y=0.63x+0.69	0.80	y=0.92x+0.21
Toronto	0.58	0.67	0.46	y=0.55x+0.80	0.56	y=0.91x+0.16
Rikubetsu	0.61	0.67	0.49	y=1.20x-0.35	0.57	y=1.63x-1.09
Izana	0.83	0.90	0.91	y=0.79x+0.38	0.93	y=1.10x-0.16
Mauna Loa	0.36	0.49	0.77	y=0.57x+0.76	0.82	y=0.82x+0.34
Paramaribo	0.60	0.69	0.61	y=0.40x+1.07	0.69	y=0.78x+0.41
Reunion maido	0.46	0.59	0.56	y=0.94x+0.08	0.68	y=1.17x-0.29
Wollongong	0.69	0.78	0.51	y=0.72x+0.53	0.65	y=1.10x-0.12
Lauder	0.65	0.77	0.71	y=0.69x+0.53	0.78	y=1.02x-0.02

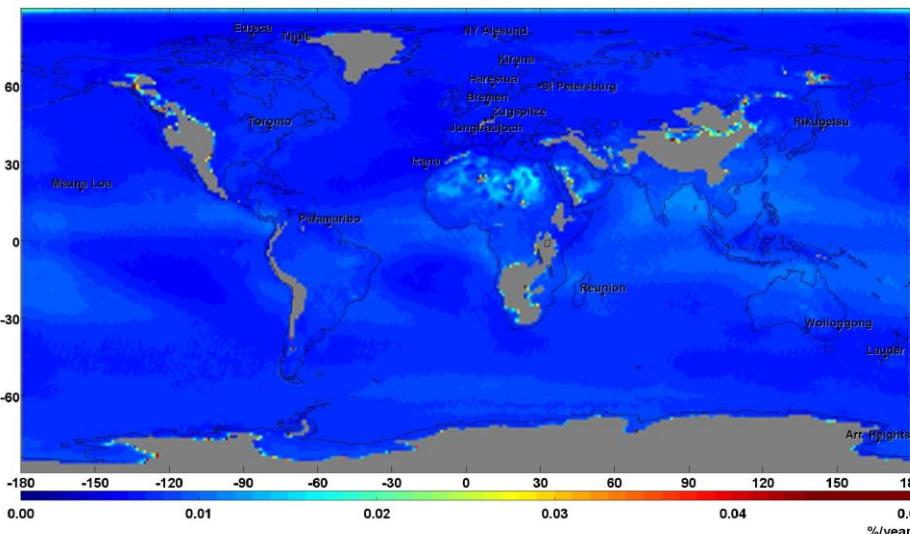
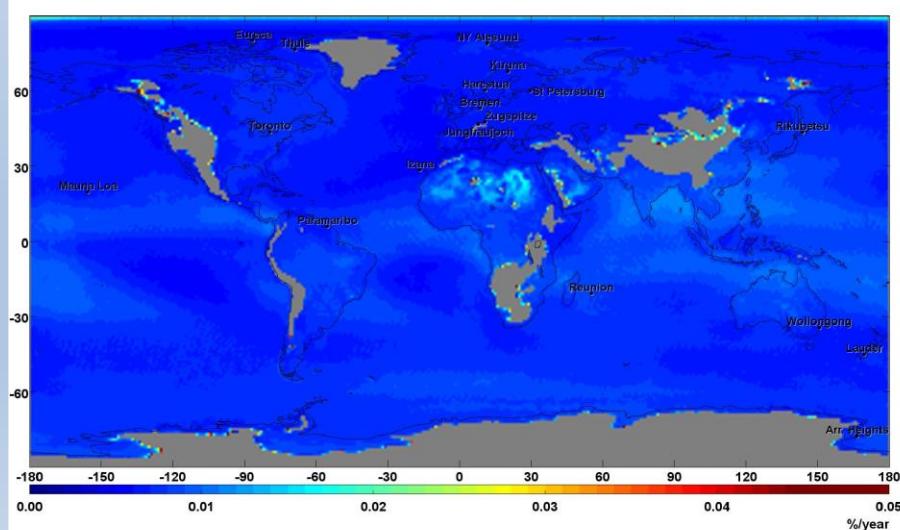
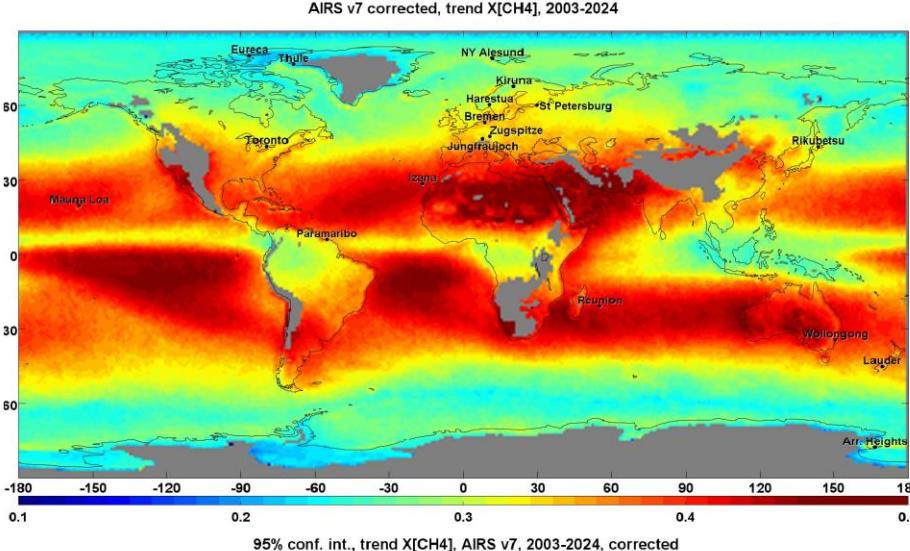
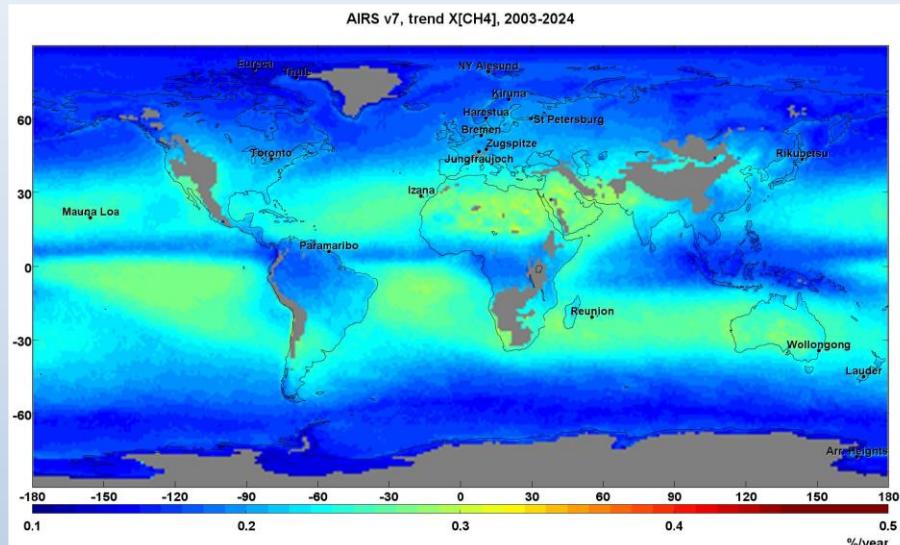
AIRS v7. Тренды X[CH₄]

Пункт	Исходный тренд, %/год			Тренд после коррекции, %/год	
	AIRS	GR	AIRS-GR	AIRS	AIRS-GR
Eureka	0.17±0.02	0.32±0.03	-0.16	0.31±0.02	-0.01
Ny Alesund	0.28±0.02	0.43±0.03	-0.16	0.42±0.02	-0.02
Thule	0.27±0.04	0.41±0.03	-0.14	0.41±0.04	0.01
Kiruna	0.21±0.02	0.32±0.02	-0.11	0.35±0.02	0.03
Harestua	0.29±0.01	0.40±0.02	-0.11	0.43±0.01	0.03
Saint Petersburg	0.29±0.03	0.45±0.05	-0.16	0.43±0.03	-0.02
Bremen	0.30±0.03	0.49±0.03	-0.18	0.44±0.02	-0.05
Zugspitze	0.29±0.02	0.50±0.03	-0.20	0.43±0.02	-0.06
Jungfraujoch	0.29±0.01	0.44±0.02	-0.14	0.43±0.01	0.00
Toronto	0.31±0.01	0.43±0.02	-0.12	0.45±0.01	0.02
Rikubetsu	0.27±0.02	0.37±0.02	-0.10	0.41±0.02	0.04
Izana	0.28±0.04	0.28±0.04	0.00	0.43±0.04	0.15
Mauna Loa	0.34±0.01	0.44±0.01	-0.10	0.48±0.01	0.04
Paranaribo	0.30±0.01	0.49±0.02	-0.19	0.44±0.01	-0.05
Reunion Maido	0.21±0.02	0.34±0.05	-0.13	0.36±0.02	0.02
Wollongong	0.29±0.04	0.51±0.03	-0.22	0.42±0.04	-0.08
Lauder	0.23±0.02	0.39±0.01	-0.16	0.37±0.01	-0.02
Arrival Heights	0.26±0.01	0.37±0.01	-0.11	0.40±0.01	0.03
Среднее	0.27±0.02	0.41±0.03		0.41±0.02	

Применение методики динамической коррекции (реализовано с помощью программного комплекса ИФА РАН, свидетельство о регистрации № 2025619712)

Тренды X[CH₄] AIRS v7 (2003-2024) и их 95% доверительные интервалы

Период	Тренд X[CH ₄] (ppb/год)	95% ДИ (ppb/год)
до коррекции	0.25	±0.05
после коррекции	0.28	±0.06



Продукт ОС CO AIRS v.6

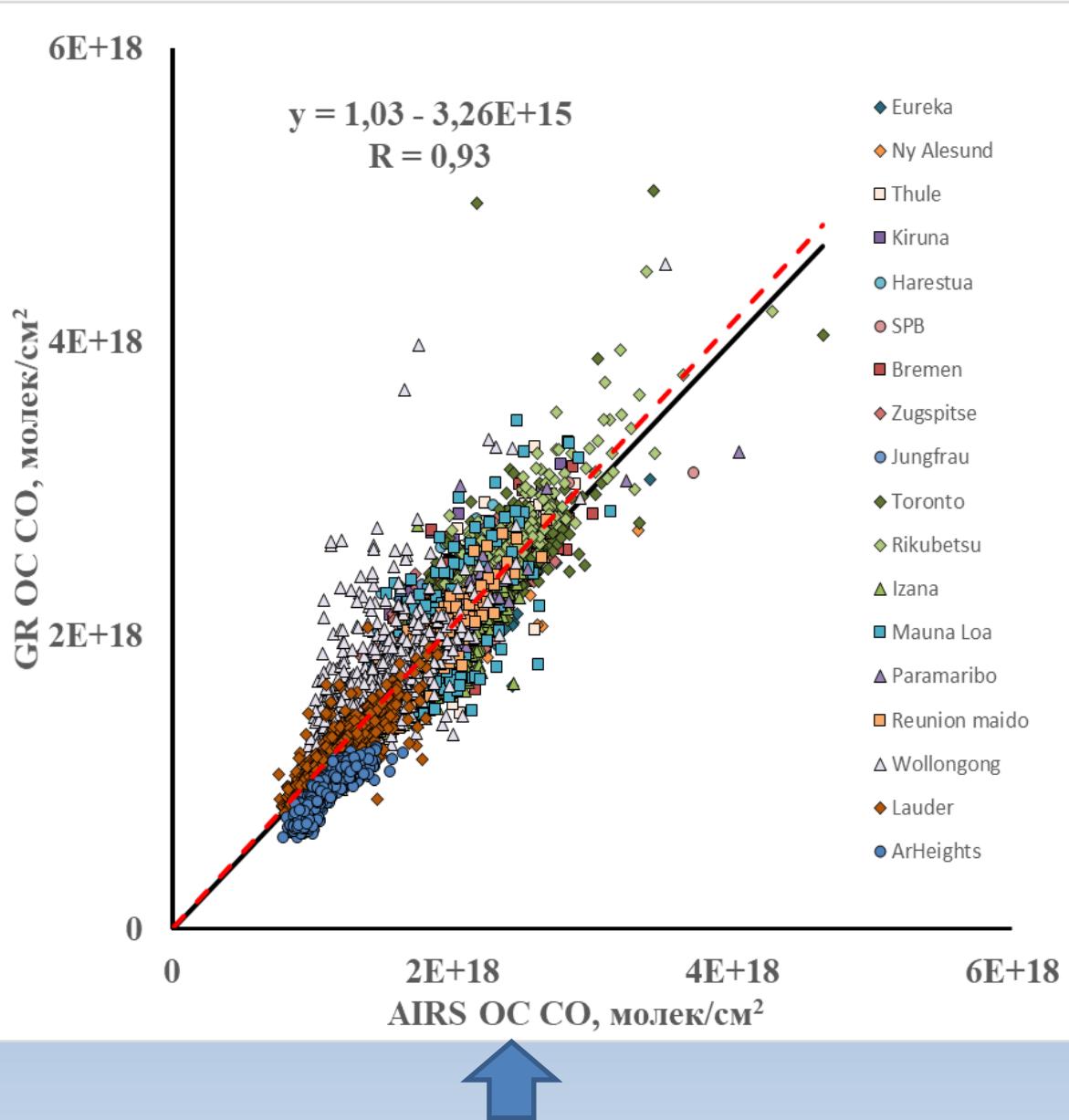
Данные ОС CO AIRS v6 Standard L3 Only Daily. Использованы все парные значения.

Пункт	Наклон разности. молек/см ² ($\times 10^{12}$)
Eureka	36.8 \pm 8.20
NY Alesund	19.2 \pm 5.61
Thule	30.3 \pm 3.28
Kiruna	10.1 \pm 3.72
Harestua	13.8 \pm 5.39
Saint Petersburg	-4.89 \pm 5.25
Bremen	-1.33 \pm 6.12
Zugspitze	-5.59 \pm 1.99
Jungfrau	-10.9 \pm 2.78
Toronto	-3.93 \pm 4.45
Rikubetsu	-5.17 \pm 11.2
Izana	-1.88 \pm 3.16
Mauna Loa	-8.64 \pm 7.18
Paramaribo	-8.14 \pm 11.1
Reunion maito	0.76 \pm 8.95
Wollongong	6.28 \pm 3.80
Lauder	-7.81 \pm 1.96
Arrival Heights	-14.2 \pm 3.22

Постанционно определена величина наклона линейного тренда разности AIRS-GR.

В отличие от рядов CH₄, тренд «невязки» (разности AIRS-GR) для ОС CO имеет различную направленность и на многих станциях **статистически незначим**.

Продукт ОС CO AIRS v.6



Пункт	R
Eureka	0.80
NY Alesund	0.95
Thule	0.93
Kiruna	0.92
Harestua	0.91
Saint Petersburg	0.93
Bremen	0.90
Zugspitze	0.91
Jungfrau	0.92
Toronto	0.85
Rikubetsu	0.93
Izana	0.88
Mauna Loa	0.85
Paramaribo	0.87
Reunion maito	0.94
Wollongong	0.79
Lauder	0.89
Arrival Heights	0.90

AIRS/ NDACC ОС CO: общий массив для всех станций

Тренды ОС СО AIRS vs NDACC

Пункт	Тренд AIRS, %/год	Тренд GR, %/год	AIRS-GR, %/год	N
Eureka	-0.13 ± 0.18	-0.84 ± 0.26	0.70	777
NY Alesund	-0.79 ± 0.24	-1.15 ± 0.30	0.36	415
Thule	-0.60 ± 0.10	-1.15 ± 0.14	0.54	1315
Kiruna	-0.80 ± 0.14	-0.93 ± 0.16	0.13	752
Harestua	-1.19 ± 0.20	-1.37 ± 0.21	0.18	681
Saint Petersburg	-0.89 ± 0.25	-0.80 ± 0.26	0.10	793
Bremen	-0.98 ± 0.23	-0.93 ± 0.22	0.05	428
Zugspitze	-0.78 ± 0.10	-0.61 ± 0.09	0.17	2137
Jungfrau	-1.11 ± 0.15	-0.82 ± 0.14	0.29	1219
Toronto	-0.87 ± 0.14	-0.76 ± 0.14	0.11	1479
Rikubetsu	-1.40 ± 0.42	-1.21 ± 0.43	0.19	352
Izana	-0.45 ± 0.13	-0.43 ± 0.13	0.01	1154
Mauna Loa	-0.95 ± 0.26	-0.73 ± 0.30	0.23	1278
Paramaribo	-0.89 ± 0.39	-0.71 ± 0.37	0.17	175
Reunion maito	1.27 ± 0.59	1.23 ± 0.62	0.04	818
Wollongong	-0.33 ± 0.13	-0.48 ± 0.16	0.15	2579
Lauder	-0.03 ± 0.13	0.22 ± 0.14	0.25	1695
Arrival Heights	-0.28 ± 0.26	0.24 ± 0.31	0.52	483
СРЕДНЕЕ	-0.62 ± 0.22	-0.62 ± 0.24	0.0	

Предварительные результаты(2005-2021 гг.) сопоставления орбитальных (OMI) и наземных (NDACC) измерений ОС NO₂

Пункт	Координаты, °N./ °E./asl, м	Годы	Уравн. лин. регрессии*	R	SAT-GR, молек/см ²	Дрейф (SAT-GR), молек/см ² /сут.
Eureka	80.1/ -86.4/ 610	2005- 2021	0.99x+6.0E+13	0.95	6.5E+12	1.8E+10 ±1.9E+10
Ny Alesund	78.9/ 11.9/ 15	2005- 2021	0.91x+6.7E+14	0.78	3.6E+14	-6.1E+9 ±3.8E+10
Kiruna	67.8/ 20.4/ 419	2005- 2021	0.67x+3.9E+14	0.94	-4.5E+14	-3.6E+10 ±2.2E+10
Bremen	53.1/ 8.80/ 27	2005- 2021	0.53x+2.2E+15	0.16	-2.5E+15	-5.7E+11 ±5.8E+11
Zugspitze**	47.4/ 11.0/ 2964	2005- 2021	- 0.08x+5.1E+15	0.23	-1.9E+14	-2.3E+11 ±1.4E+11
Jungfraujoch **	46.6/ 8.0/ 3580	2005- 2021	0.49x+2.0E+15	0.48	1.9E+14	-6.4E+10 ±5.8E+10
Izana**	28.3/ -16.5/ 2367	2005- 2021	0.50x+1.5E+15	0.49	-4.4E+14	-1.7E+10 ±2.3E10
Altzomoni**	19.1/ -98.7/ 3985	2005- 2021	0.27x+4.1E+15	0.15	2.1E+15	-1.9E+11 ±1.6E+11

Сред. по всем станциям

5.4*10¹³

-2.2*10⁹
±7.4*10⁹

Несколько спутников, с которыми работает наша группа. Итак, что мы сейчас знаем о дрейфе и сезонных вариациях невязки?

Прибор, годы	Измерения	Дрейф: да + нет –	Сезонные вариации
MODIS (2001-2024)	AOD	–	–
AIRS (2003-2024)	CO CH₄ O₃	– + –	– – +
OMI (2005-2023)	NO₂ O₃	+	+
OCO-2 (2014-2024)	CO₂	–	–
TROPOMI (2018- 2024)*	CH₄ CO NO₂	± ± –	– – +

***: Относительно короткий период**

± означает недостаточную статистически значимость

Программно-алгоритмический комплекс ИФА РАН



Выводы

1. Установлены значимые долговременные изменения параметров соответствия орбитальных данных ОС CH_4 AIRS v.6 и v7 X[CH_4] IR AIRS Only Daily высокоточным наземным измерениям станций NDACC. Тренд «невязки» для измерений AIRS v6, v7 CH_4 с 2003 по 2022 гг. отрицателен на всех исследуемых пунктах.
3. Средний коэффициент наклона линии тренда невязки для CH_4 определен как: **-1.64*10¹⁴** молек/см² в сутки (v6) и **-1.55*10¹⁴** молек/см² в сутки (v7) .
4. Применение среднего собственного давления при пересчете наземных данных на уровень моря улучшает характеристики соответствия измерений AIRS и NDACC.
5. Разработана и применена методика динамической посutoчной коррекции орбитальных рядов CH_4 . Коррекция привела к значимому улучшению параметров корреляции между орбитальными и наземными данными. Оценки трендов на основе орбитальных и наземных измерений существенно сблизились постационно и практически совпали в среднем по всем станциям: **AIRSV7: 0.41±0.03 %/год**; **NDACC: 0.41±0.02%/год** против исходной оценки AIRSV7: **0.27±0.03 %/год**.
6. Спутниковый продукт ОС CO AIRS v.6 IR Only Daily не требует динамической коррекции. В исходных рядах наземных и спутниковых измерений наблюдается высокая корреляция ($R = 0.79 - 0.95$), а средняя величина тренда по всем пунктам сопоставления совпадает между собой (**AIRS: -0.62±0.22; GR: -0.62±0.24**).
7. Разработанная методика коррекции дрейфа является универсальной, то есть применимой к любым долговременным орбитальным рядам.

Использованная литература

1. Aumann H. H., Chahine M. T., Gautier C. et. al. AIRS/AMSU/HSB on the Aqua mission: Design, science objectives, data products and processing systems // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2003. 41. No. 2. pp. 253–264
2. Thrastarson H. Th., Fetzer E. J., Ray S. Overview of the AIRS Mission: Instruments, Processing Algorithms, Products, and Documentation, 2nd Edition, The AIRS-team and the CLIMCAPS Algorithms, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Thomas Hearty, NASA / GES DISC, Nadia Smith, Science and Technology Corporation, 6 May 2021, Document Edition 2.0
3. Ракитин В.С., Фёдорова Е.И., Кириллова Н.С., Панкратова Н.В., Еланский Н.Ф. Оценка дрейфа качества орбитальных наблюдений и применение методов коррекции к долговременным рядам на примере измерений общего содержания метана с помощью спутникового прибора AIRS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 6. С. 33-47. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-33-47
4. Rakitin V., Fedorova E., Skorokhod A., Kirillova N., Pankratova N., Elansky N. Principles of Correction for Long-Term Orbital Observations of Atmospheric Composition, Applied to AIRS v.6 CH4 and CO Data // Remote Sens. 2025, 17, 2323. <https://doi.org/10.3390/rs17132323>
5. Хриан А.Х. Физика атмосферы. Ленинград: Гидрометеорологическое издательство, 1969 г., 644 с.
6. De Mazière M., Thompson A. M., Kurylo M. J. et. al. The Network for the Detection of Atmospheric Composition Change (NDACC): History, status and perspectives // Atmospheric Chemistry and Physics. 2018. 18. pp. 4935–4964
7. Laughner J. L., Toon G. C., Mendonca J. et. al. The Total Carbon Column Observing Network's GGG2020 data version // Earth Syst. Sci. Data. 2024. 16. pp. 2197–226
8. Rakitin V. S., Kazakov A. V., Elansky N. F., Multifunctional software of the OIAP RAS for processing and analysis of orbital data on the atmospheric composition: Tasks, possibilities, application results, and ways of development // Proc. SPIE. – 29-th Intern. Symp. Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. – 2023 – 12780 – 127805T.
9. Ракитин В.С., Казаков А.В., Еланский Н.Ф., Кириллова Н.С., Федорова Е.И. Программа для визуализации и анализа орбитальной информации о составе атмосферы // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2025619712, 17.04.2025.

Спасибо за внимание!

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда,

Проект №25-77-31009