



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

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

*E-mail: [vadim@ifaran.ru](mailto: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.**

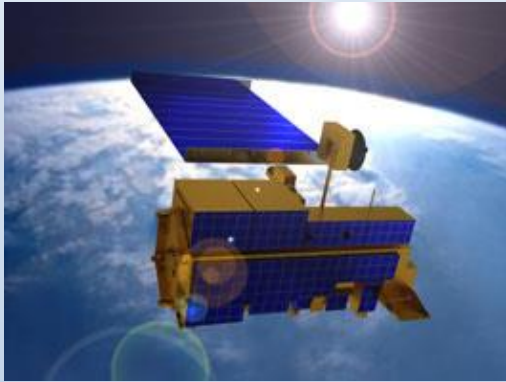
# Орбитальные спектрометры

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

**MODIS/Terra/Aqua:**  
**AOD, O<sub>3</sub>, облачность**

**AIRS/Aqua:**  
**CO, CH<sub>4</sub>, O<sub>3</sub>, метео**

**OMI/Aura:**  
**содержание NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>**



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
OC CH <sub>4</sub>	AIRS Standard L3 v.6/v7 IR AIRS Only Daily	V6: TotCH4_A* Общее содержание в столбе CH <sub>4</sub> [молек/см <sup>2</sup> ]  V7: VMR_CH4_A, объемная концентрация на 24 уровнях [ppbv] Разрешение 1°×1°,
OC CO	Standard L3 v6 IR AIRS Only Daily	TotCO_A Общее содержание в столбе CO  Разрешение 1°×1°, [молек/см <sup>2</sup> ]
Altitude	—	Topography.  Разрешение 1°×1°, [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\*1°.

# Расположение наземных спектрометров NDACC





# Сведения о пунктах измерений NDAСС [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 <sub>4</sub> /CO
2	Ny Alesund	78.9N/11.9E	15	0.998	2003-2022	CH <sub>4</sub> /CO
3	Thule,	76.5N/68.7W	220	0.973	2003-2022	CH <sub>4</sub> /CO
4	Kiruna	67.8N/20.4E	419	0.949	2003-2022	CH <sub>4</sub> /CO
5	Harestua	60.2N/10.8E	596	0.928	2009-2020	CH <sub>4</sub>
					2003-2018	CO
6	Saint-Petersburg	59.9N/29.8E	20	0.997	2009-2022	CH <sub>4</sub> /CO
7	Bremen	53.1N/8.8E	27	0.997	2004-2022	CH <sub>4</sub> /CO
8	Zugspitze	47.4N/11.0E	2964	0.690	2003-2022	CH <sub>4</sub> /CO
9	Jungfrauoch	46.5N/8.0E	3580	0.638	2003-2022	CH <sub>4</sub> /CO
10	Toronto – TAO*	43.7N/79.4W	174	0.978	2003-2019*	CH <sub>4</sub>
					2003-2022	CO
11	Rikubetsu	43.5N/143.8E	380	0.953	2003-2019	CH <sub>4</sub>
					2003-2018	CO
12	Izana, Tenerife	28.3N/16.5W	2367	0.743	2003-2022	CH <sub>4</sub> /CO
13	Mauna Loa	19.5N/155.9W	3397	0.653	2003-2022	CH <sub>4</sub> /CO
14	Paramaribo	5.7N/55.2W	23	0.997	2004-2022	CH <sub>4</sub>
					2004-2018	CO
15	Reunion Maida	21.1S/55.4E	2155	0.763	2013-2019	CH <sub>4</sub> /CO
16	Wollongong	34.4S/150.9E	30	0.996	2003-2022	CH <sub>4</sub> /CO
17	Lauder	45.0S/169.7E	370	0.955	2003-2021	CH <sub>4</sub> /CO
18	Arrival Heights	77.8S/166.7E	184	0.977	2003-2022	CH <sub>4</sub> /CO

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

\*\*«ступенька» (сдвиг) наземных данных ОС CH<sub>4</sub> после 2019 г.

# Приведение данных NDAСС к уровню моря

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

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

$P$  – атмосферное давление на уровне станции, мбар

$P_0$  – атмосферное давление на уровне моря, 1013 мбар

Давление на уровне станции рассчитывается следующим образом:

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

$P$  – давление в слое заданной высоты  $h$

$h-h_0$  – разность высот, равная  $h$  при расчёте для уровня моря. м

$P_0$  – давление на уровне моря

$k$  – универсальная газовая постоянная

$T$  – абсолютная температура в градусах Кельвина

$M$  – молярная масса воздуха

$g$  – ускорение свободного падения.

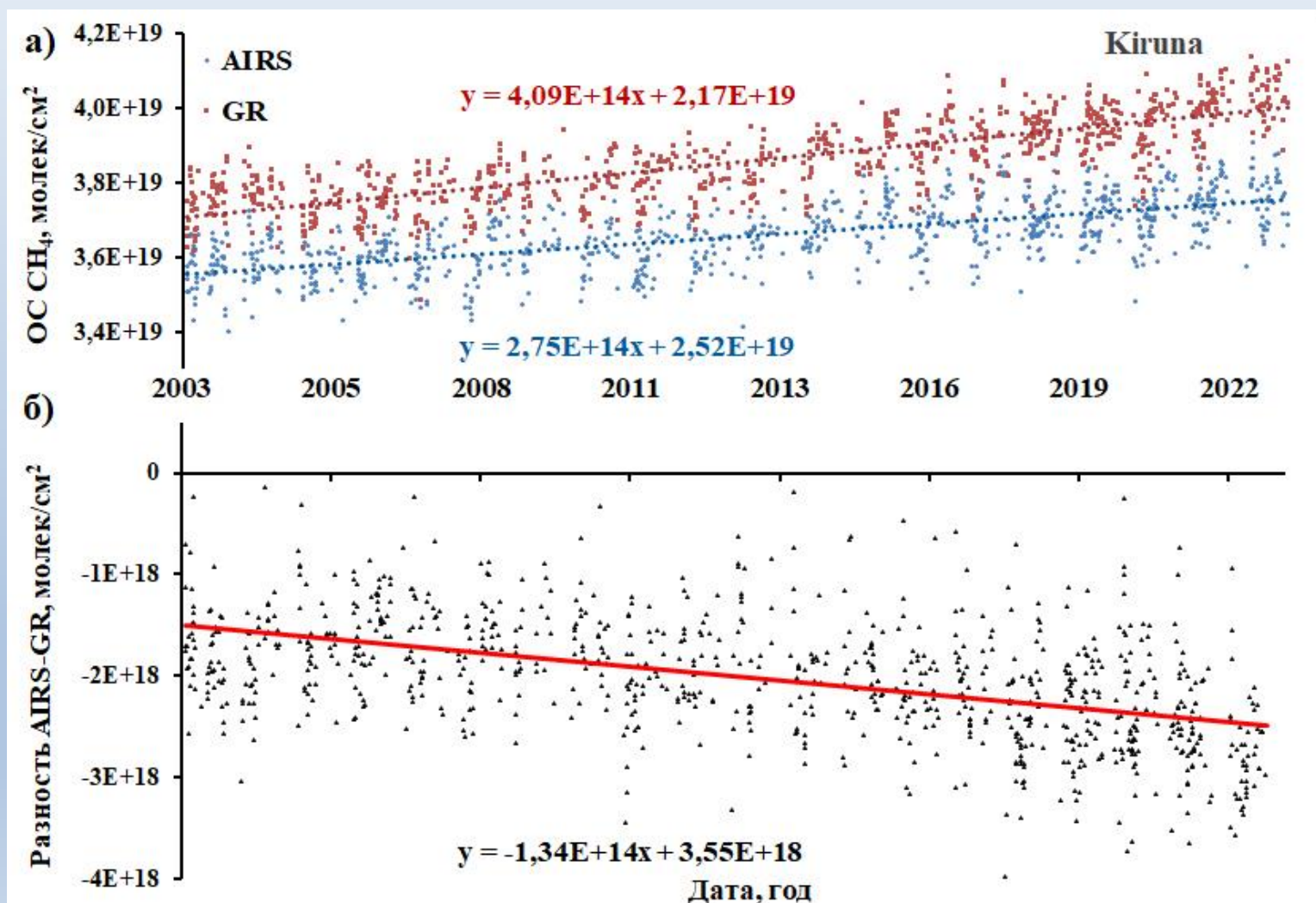
Таким образом коэффициент перевода значения общего содержания в столбе к уровню моря равен:

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

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

## AIRS v6. Определение спутникового дрейфа «невязки» ОС CH<sub>4</sub>

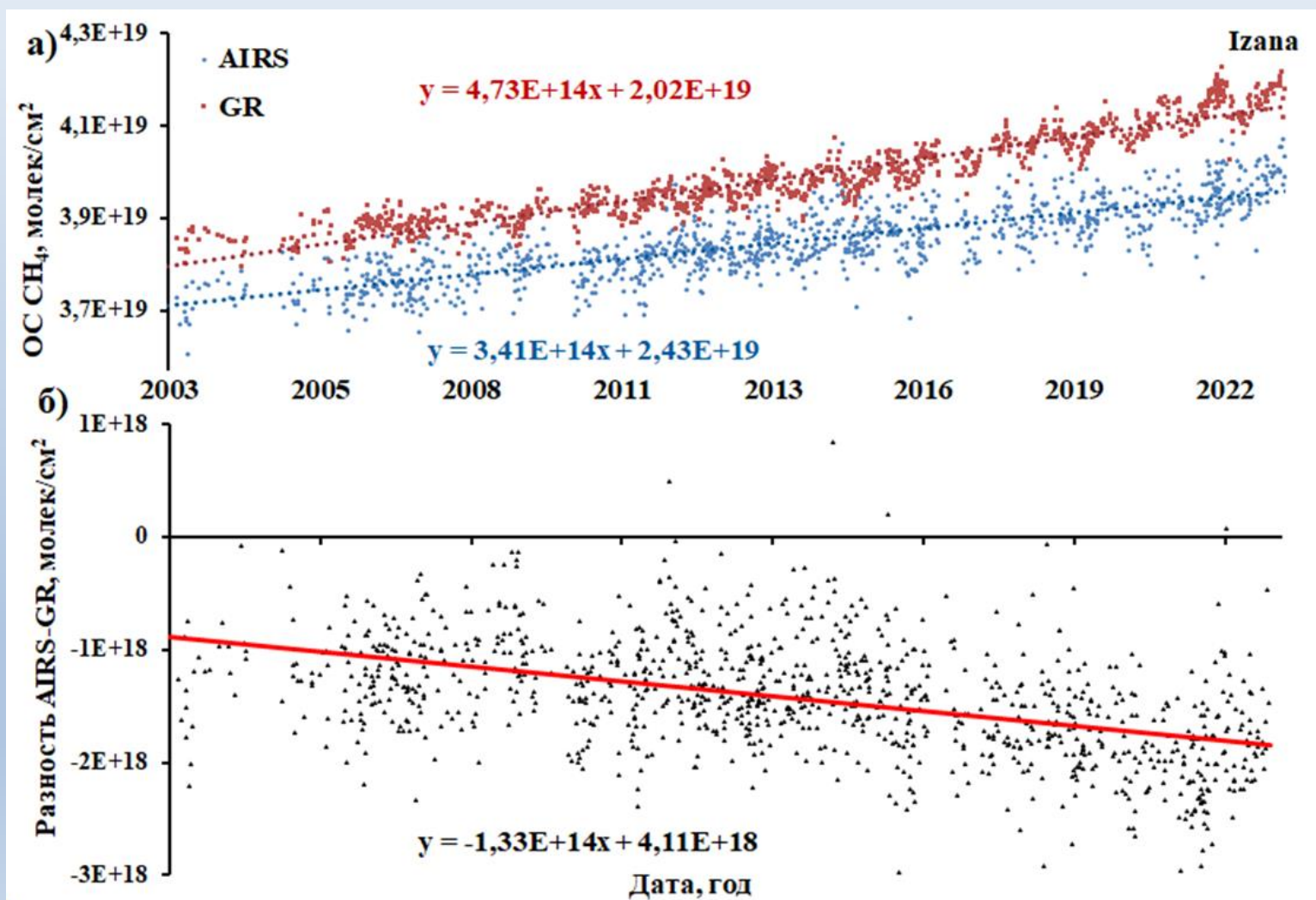
Установлены значимые изменения параметров соответствия орбитальных данных ОС CH<sub>4</sub> AIRS Standard L3 v.6 IR AIRS Only Daily наземным наблюдениям станций NDACC. Тренд «невязки» оказался отрицателен на всех исследуемых пунктах и определен как долговременной дрейф параметров спутникового прибора.





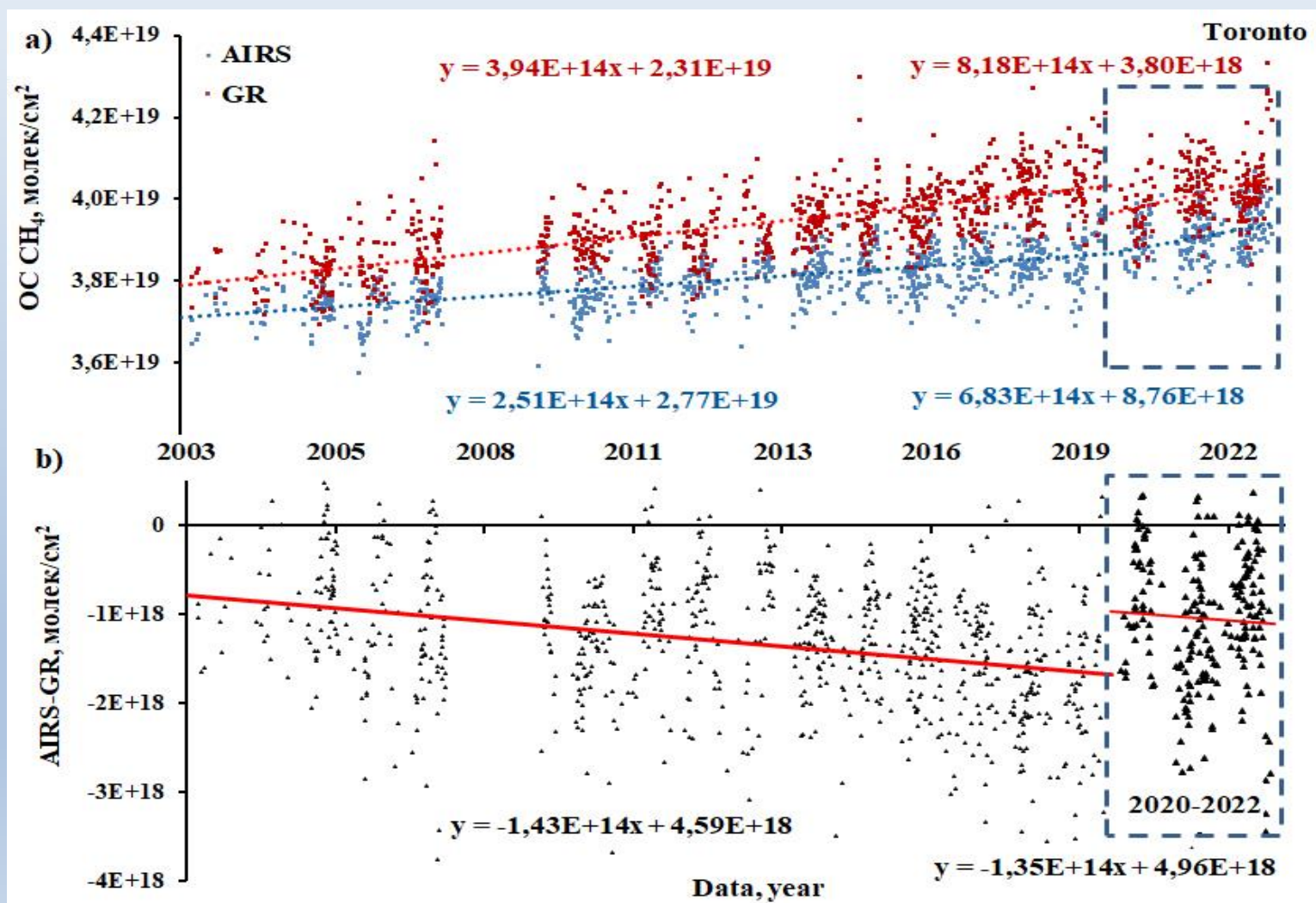
## AIRS v6. Определение спутникового дрейфа «невязки» ОС CH<sub>4</sub>

Установлены значимые изменения параметров соответствия орбитальных данных ОС CH<sub>4</sub> 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 CH<sub>4</sub>

Установлены значимые изменения параметров соответствия орбитальных данных ОС CH<sub>4</sub> 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 CH<sub>4</sub> (барометрическая формула)

Satellite spectrometer drift (SSD) =  $-1.69 \cdot 10^{14}$  молек/см<sup>2</sup> в сутки

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

# Коррекция AIRS v6

**Satellite spectrometer drift (SSD) =  $-1.69 \cdot 10^{14}$  молек/см<sup>2</sup> в сутки (БФ)  
и SSD =  $-1.64 \cdot 10^{14}$  молек/см<sup>2</sup> в сутки (ССД)**

Коррекция рядов AIRS осуществлялась посуточно:

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

где:

OC CH<sub>4</sub> SSD – скорректированное посуточное спутниковое значение OC CH<sub>4</sub>, [молек/см<sup>2</sup>]

OC CH<sub>4</sub> – общее содержание CH<sub>4</sub> [молек /см<sup>2</sup>] по данным AIRS V6 L3

N – порядковый номер дня, начиная с 01.01.2003

SSD – коэффициент дрейфа

# **Параметры корреляции AIRSv6/GR по ОС CH<sub>4</sub>:** **барометрическая формула (БФ) и собственное** **(измеренное) среднее давление (ССД)**

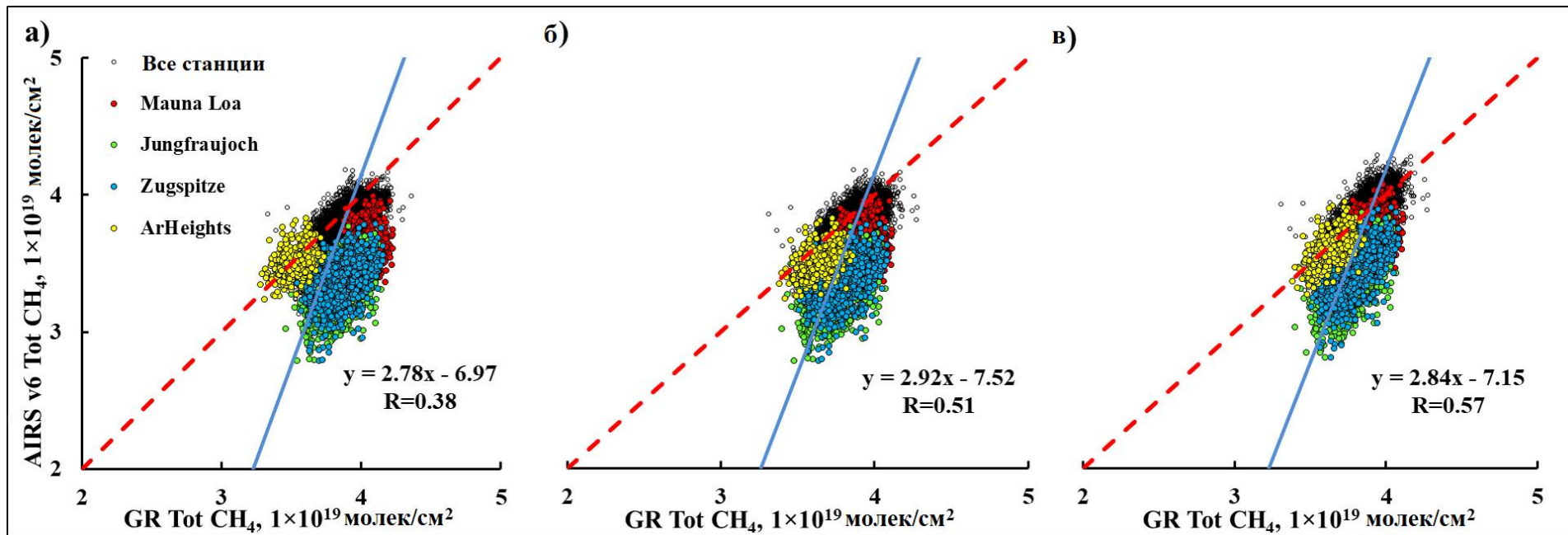
Пункт	Исходные ряды, R	После коррекции, R
Eureka	0.62	0.72
Ny Alesund	0.74	0.83
Thule	0.66	0.76
Kiruna	0.84	0.90
Harestua	0.68	0.74
Saint Petersburg	0.69	0.78
Bremen	0.77	0.84
Zugspitze	0.48	0.61
Jungfrauoch	0.46	0.58
Toronto	0.58	0.67
Rikubetsu	0.61	0.67
Izana	0.83	0.90
Mauna Loa	0.36	0.49
Paranaribo	0.60	0.69
Reunion Mado	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 $\text{CH}_4$ : барометрическая формула (БФ) и собственное (измеренное) среднее давление (ССД)

Корреляция общего массива спутниковых  
и наземных измерений ОС  $\text{CH}_4$

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 Maida.** Высота ячейки  $1^{\circ}1^{\circ}$  оценена спутником близкой к 0 м н.у.м. Данные ложатся в общий массив с другими пунктами измерений.

Корреляция в массиве:

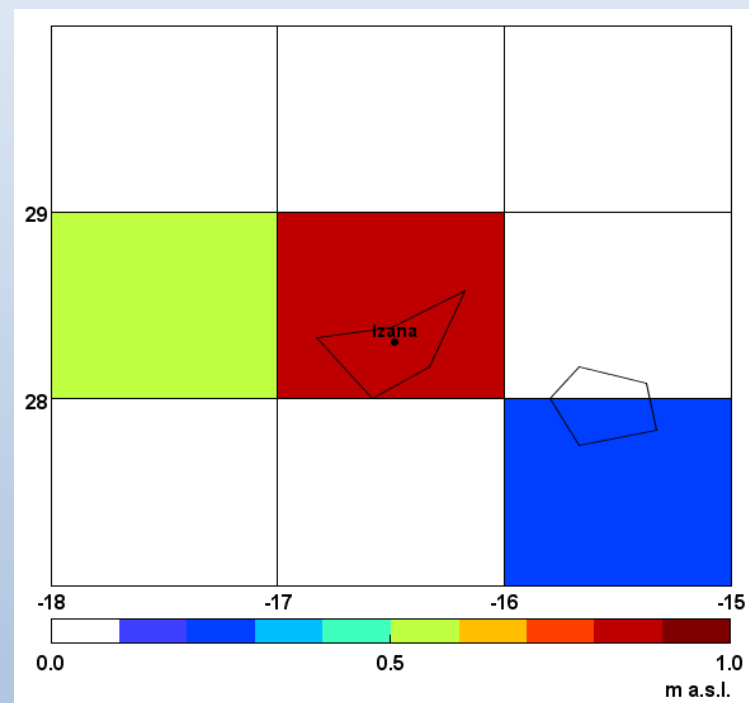
- до коррекции  $R = 0.71$
- после коррекции  $R = 0.76$

**Zugspitze, Jungfraujoeh, 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.
<b>Zugspitze</b>	<b>2964</b>	<b>1264</b>
<b>Jungfraujoeh</b>	<b>3580</b>	<b>1551</b>
<b>Mauna Loa</b>	<b>3397</b>	<b>1301</b>
Reunion Maida	2155	0
Izana	2367	1



**Пункт Izana.**  
**Переменная «topography» AIRS**

# AIRS v6. Тренды ОС CH<sub>4</sub>. 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 Maito	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	<b>0.27±0.03</b>	<b>0.40±0.02</b>	<b>-0.13</b>	<b>0.42±0.03</b>	<b>0.02</b>

# AIRSV7, X[CH<sub>4</sub>]: также, как для v6, обнаружен однонаправленный статистически значимый дрейф невязки SSD = -7.20×10-6 ppm/день (-1.55\*10<sup>14</sup> молек/см<sup>2</sup>/день)

Пункт	AIRS v6 OC CH <sub>4</sub>		AIRS v7 X[CH <sub>4</sub> ]			
	Исходные	Коррекция	Исходн. данные		Коррекция	
	R	R	R	Орт. регресс.	R	Орт. регресс.
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
Jungfraujo	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
Point Barrow						

# AIRS v7. Тренды X[CH<sub>4</sub>]

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 Maito	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	<b>0.27±0.02</b>	<b>0.41±0.03</b>		<b>0.41±0.02</b>	

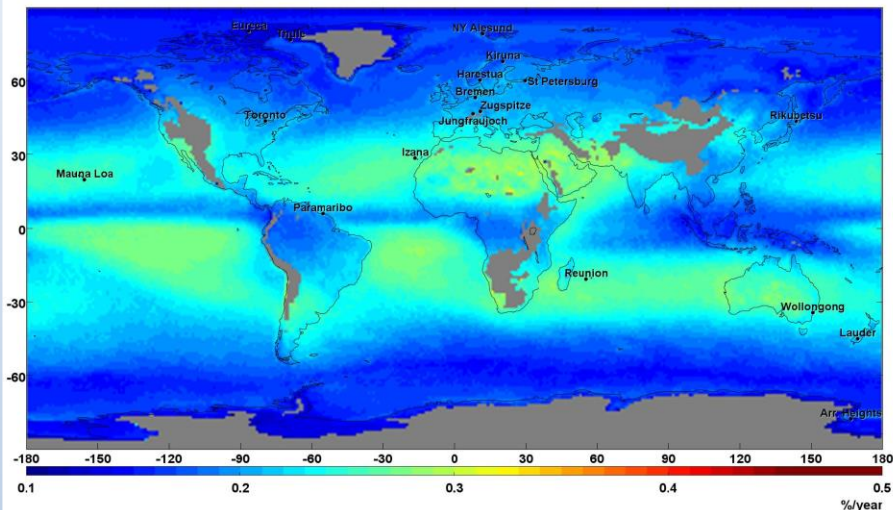


# Применение методики динамической коррекции (реализовано с помощью программного комплекса ИФА РАН, свидетельство о регистрации № 2025619712)

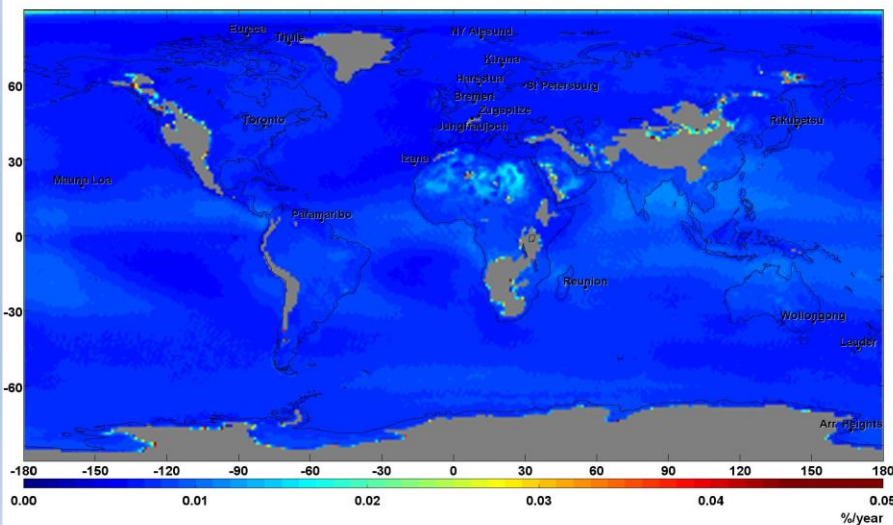
## Тренды $X[\text{CH}_4]$ AIRS v7 (2003-2024) и их 95% доверительные интервалы до коррекции

## после коррекции

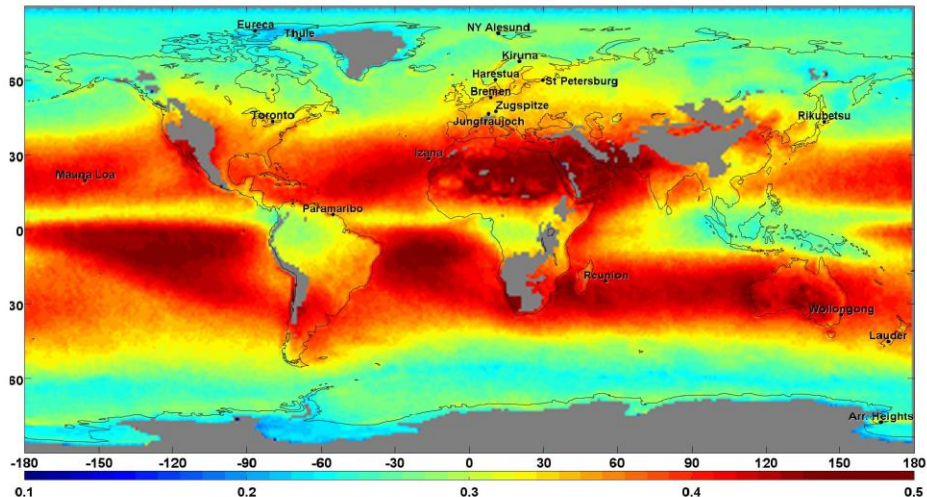
AIRS v7, trend  $X[\text{CH}_4]$ , 2003-2024



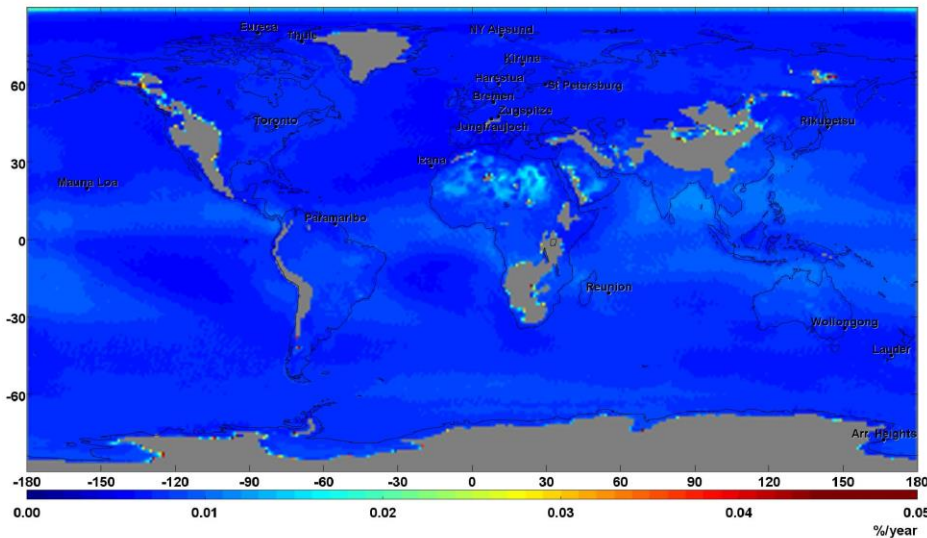
95% conf. int., trend  $X[\text{CH}_4]$ , AIRS v7, 2003-2024



AIRS v7 corrected, trend  $X[\text{CH}_4]$ , 2003-2024



95% conf. int., trend  $X[\text{CH}_4]$ , AIRS v7, 2003-2024, corrected



## Продукт ОС СО AIRS v.6

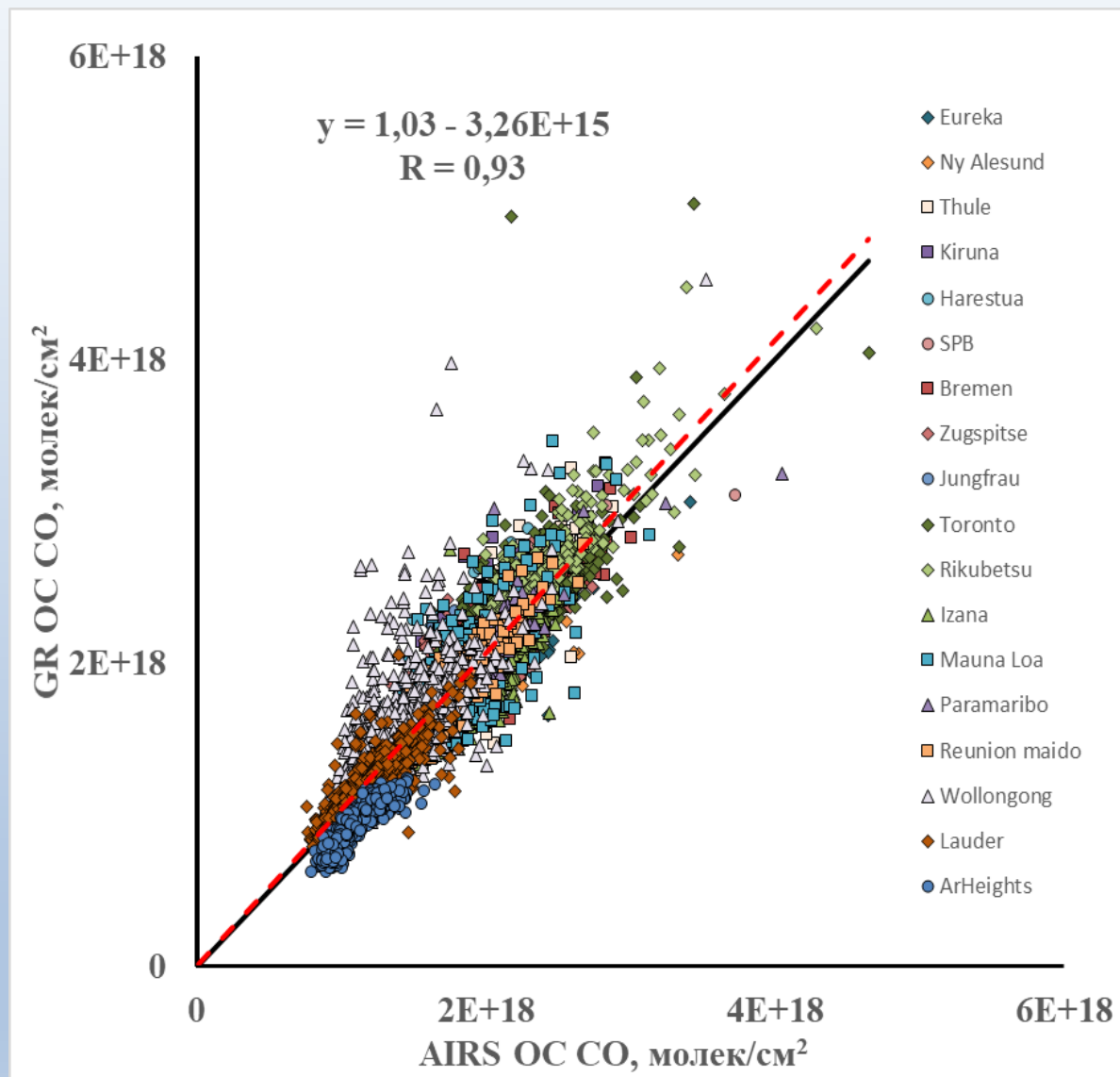
Данные ОС СО AIRS v6 Standard L3 Only Daily. Использованы все парные значения.

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

Постанционно определена величина наклона линейного тренда разности AIRS-GR.

В отличие от рядов CH<sub>4</sub>, тренд «невязки» (разности AIRS-GR) для ОС СО 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 maido	0.94
Wollongong	0.79
Lauder	0.89
Arrival Heights	0.90



AIRS/ NDACC OC CO: общий массив для всех станций

## Тренды ОС CO 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 maido	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
<b>СРЕДНЕЕ</b>	<b>-0.62±0.22</b>	<b>-0.62±0.24</b>	<b>0.0</b>	



# Предварительные результаты(2005-2021 гг.) сопоставления орбитальных (ОМІ) и наземных (NDACC) измерений ОС NO<sub>2</sub>

Пункт	Коорд., °N./ °E./ asl, м	Годы	Уравн. лин. регрессии*	R	SAT-GR, молек/см <sup>2</sup>	Дрейф (SAT-GR), молек/см <sup>2</sup> /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	<b>-3.6E+10</b> <b>±2.2E+10</b>
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	<b>-2.3E+11</b> <b>±1.4E+11</b>
Jungfraujoch **	46.6/ 8.0/ 3580	2005- 2021	0.49x+2.0E+15	0.48	1.9E+14	<b>-6.4E+10</b> <b>±5.8E+10</b>
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	<b>-1.9E+11</b> <b>±1.6E+11</b>
<b>Сред. по всем станциям</b>					<b>5.4*10<sup>13</sup></b>	<b>-2.2*10<sup>9</sup></b> <b>±7.4*10<sup>9</sup></b>



**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	—	—
	CH <sub>4</sub>	+	—
	O <sub>3</sub>	—	+
OMI (2005-2023)	NO <sub>2</sub>	+	+
	O <sub>3</sub>	—	+
OCO-2 (2014-2024)	CO <sub>2</sub>	—	—
TROPOMI (2018- 2024)*	CH <sub>4</sub>	±	—
	CO	±	—
	NO <sub>2</sub>	—	+

**\*: Относительно короткий период**  
**± означает недостаточную статистическую значимость**

# Программно-алгоритмический комплекс ИФА РАН



# Выводы

1. Установлены значимые долговременные изменения параметров соответствия орбитальных данных ОС CH<sub>4</sub> AIRS v.6 и v7 X[CH<sub>4</sub>] IR AIRS Only Daily высокоточным наземным измерениям станций NDACC. Тренд «невязки» для измерений AIRS v6, v7 CH<sub>4</sub> с 2003 по 2022 гг. отрицателен на всех исследуемых пунктах.
3. Средний коэффициент наклона линии тренда невязки для CH<sub>4</sub> определен как:  
**-1.64\*10<sup>14</sup>** молек/см<sup>2</sup> в сутки (v6) и **-1.55\*10<sup>14</sup>** молек/см<sup>2</sup> 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 посуточной коррекции орбитальных рядов CH<sub>4</sub>. Коррекция привела к значимому улучшению параметров корреляции между орбитальными и наземными данными. Оценки трендов на основе орбитальных и наземных измерений существенно сблизились постанционно 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 CH<sub>4</sub> and CO Data // Remote Sens. 2025, 17, 2323. <https://doi.org/10.3390/rs17132323>
5. Хргиан 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*