



Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН Москва, Россия

**Оценка дрейфа качества орбитальных наблюдений и  
применение методов коррекции к долговременным рядам  
на примере измерений общего содержания метана с  
помощью прибора AIRS**

**В.С. Ракитин, Е.И. Федорова, Н.С. Кириллова,  
Н.В. Панкратова, Н.Ф. Еланский**

E-mail: [fedorova@ifaran.ru](mailto:fedorova@ifaran.ru)

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

**11-15 ноября 2024 г., Москва**

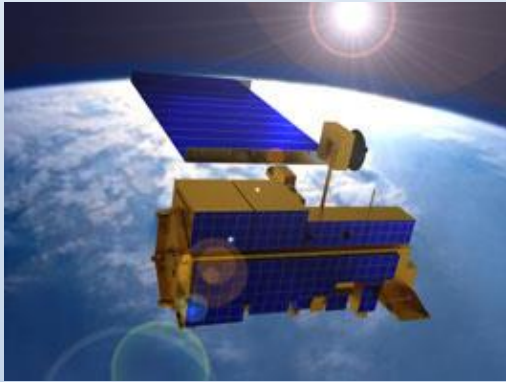
# Орбитальные спектрометры

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

**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 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  $-180^\circ$  до  $+180^\circ$  восточной долготы и  $-90^\circ$  до  $+90^\circ$  северной широты.

# Информация о продукте AIRS

Параметр	Спутниковый продукт	Кодировка	Переменная для извлечения
OC CH <sub>4</sub>	AIRS Standard L3 v.6 IR AIRS Only Daily	AIRS3STD	TotCH4_A* Общее содержание в столбе CH <sub>4</sub> , разрешение 1°×1°, молек/см <sup>2</sup>
OC CO	Standard L3 *IR AIRS Only Daily	AIRS3STD	TotCO_A Общее содержание в столбе CO, разрешение 1°×1°, молек/см <sup>2</sup>
Altitude	—	—	Topography Topography of the Earth in meters above the geoid, resolution 1°×1°, m



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) (<https://ndacc.larc.nasa.gov>).

Координаты каждого наземного пункта **являются центром ячейки** спутниковых измерений 1\*1°.

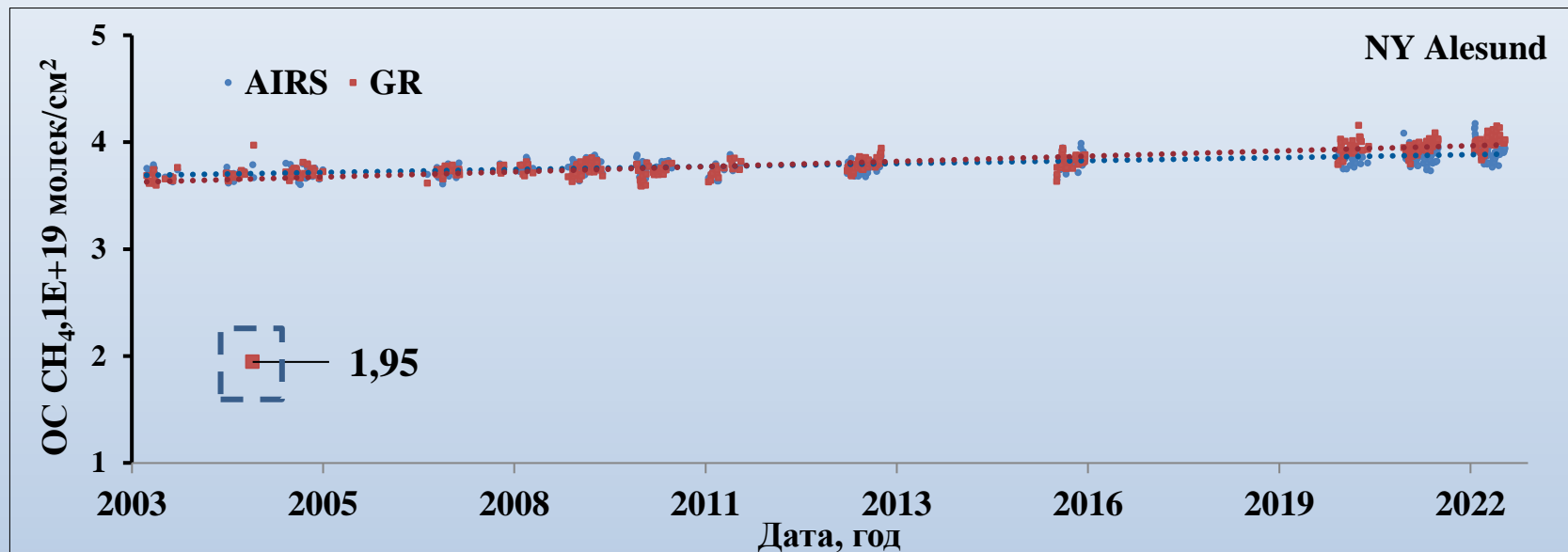
# Перечень пунктов измерений

№	Пункт измерений	Широта/ Долгота, °	Высота н.у.м	Коэф. у.м*	Период измерений	Параметр, ОС
1	Eureka, Canada	80,0N/86,4W	610	<b>0,926</b>	2006-2020	CH <sub>4</sub> /CO
2	Ny Alesund, Norway	78,9N/11,9E	15	<b>0,998</b>	2003-2022	CH <sub>4</sub> /CO
3	Thule, Greenland	76,5N/68,7W	220	<b>0,973</b>	2003-2022	CH <sub>4</sub> /CO
4	Kiruna, Sweden	67,8N/20,4E	419	<b>0,949</b>	2003-2022	CH <sub>4</sub> /CO
5	Harestua, Norway	60,2N/10,8E	596	<b>0,928</b>	2009-2020	CH <sub>4</sub>
					2003-2018	CO
6	SPB, Russian Federation	59,9N/29,8E	20	<b>0,997</b>	2009-2022	CH <sub>4</sub> /CO
7	Bremen, Germany	53,1N/8,8E	27	<b>0,997</b>	2004-2022	CH <sub>4</sub> /CO
8	Zugspitze, Germany	47,4N/11,0E	2964	<b>0,690</b>	2003-2022	CH <sub>4</sub> /CO
9	Jungfrauoch, Switzerland	46,5N/8,0E	3580	<b>0,638</b>	2003-2022	CH <sub>4</sub> /CO
10	Toronto - TAO, Canada	43,7N/79,4W	174	<b>0,978</b>	2003-2019*	CH <sub>4</sub>
					2003-2022	CO
11	Rikubetsu, Japan	43,5N/143,8E	380	<b>0,953</b>	2003-2019	CH <sub>4</sub>
					2003-2018	CO
12	Izana, Tenerife, Spain	28,3N/16,5W	2367	<b>0,743</b>	2003-2022	CH <sub>4</sub> /CO
13	Mauna Loa, HI, U.S.	19,5N/155,9W	3397	<b>0,653</b>	2003-2022	CH <sub>4</sub> /CO
14	Paramaribo, Suriname	5,7N/55,2W	23	<b>0,997</b>	2004-2022	CH <sub>4</sub>
					2004-2018	CO
15	Reunion Maido, France	21,1S/55,4E	2155	<b>0,763</b>	2013-2019	CH <sub>4</sub> /CO
16	Wollongong, Australia	34,4S/150,9E	30	<b>0,996</b>	2003-2022	CH <sub>4</sub> /CO
17	Lauder, New Zealand	45,0S/169,7E	370	<b>0,955</b>	2003-2021	CH <sub>4</sub> /CO
18	Arrival Heights, Antarctica	77,8S/166,7E	184	<b>0,977</b>	2003-2022	CH <sub>4</sub> /CO

\*коэффициент рассчитан посредством применения барометрической формулы  
(Хргиан А.Х., 1969)

# Работа с исходными данными

На этапе оценки качества исходных данных применялись методы фильтрации. В работе использованы только парные значения AIRS/GR.



К исходным рядам наземных измерений таких станций, как:

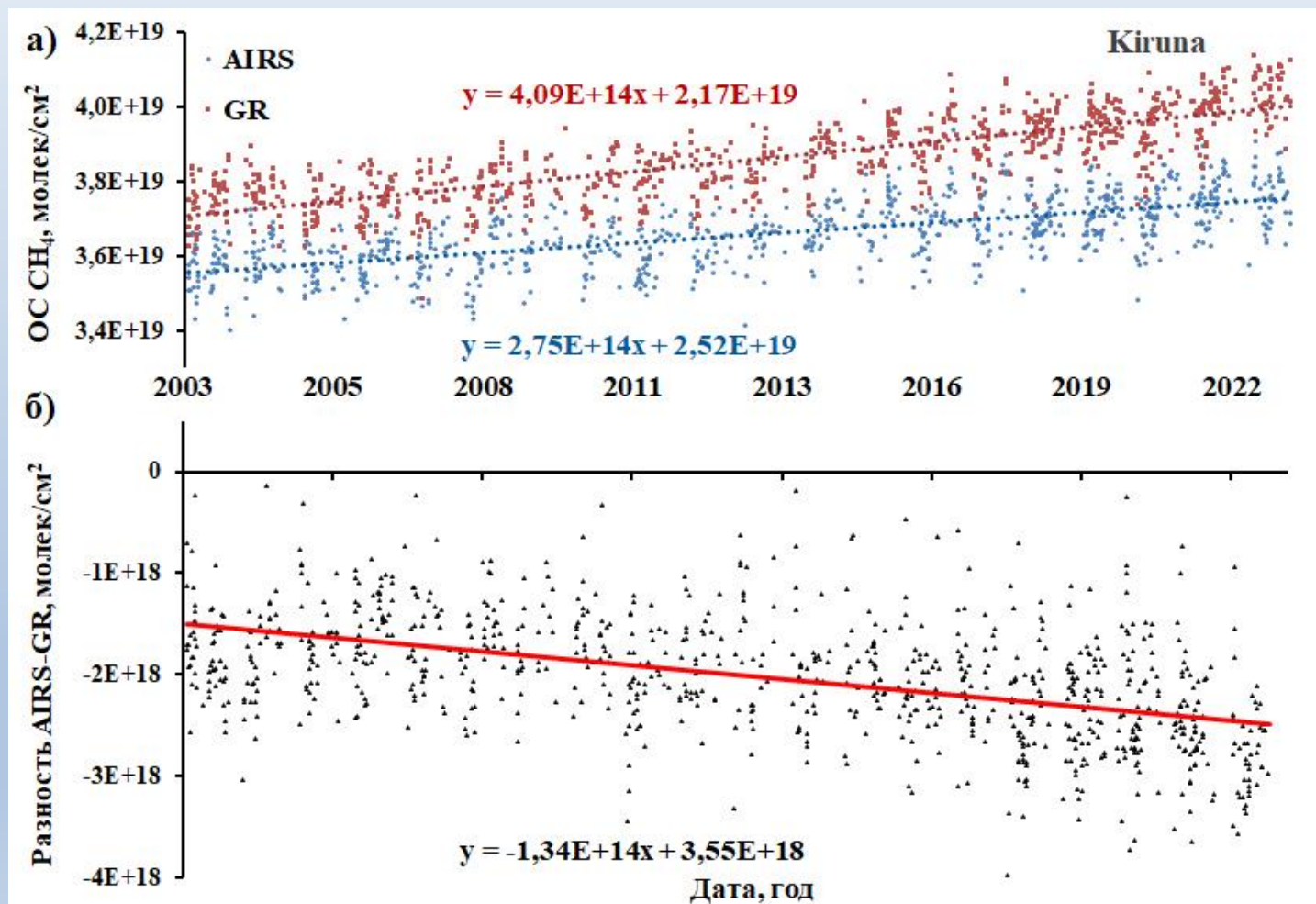
- NY Alesund;
- Harestua;
- Bremen;
- Mauna Loa;
- Paramaribo

с целью отсева случайных артефактных данных применен метод исключения трех минимальных и трех максимальных значений.



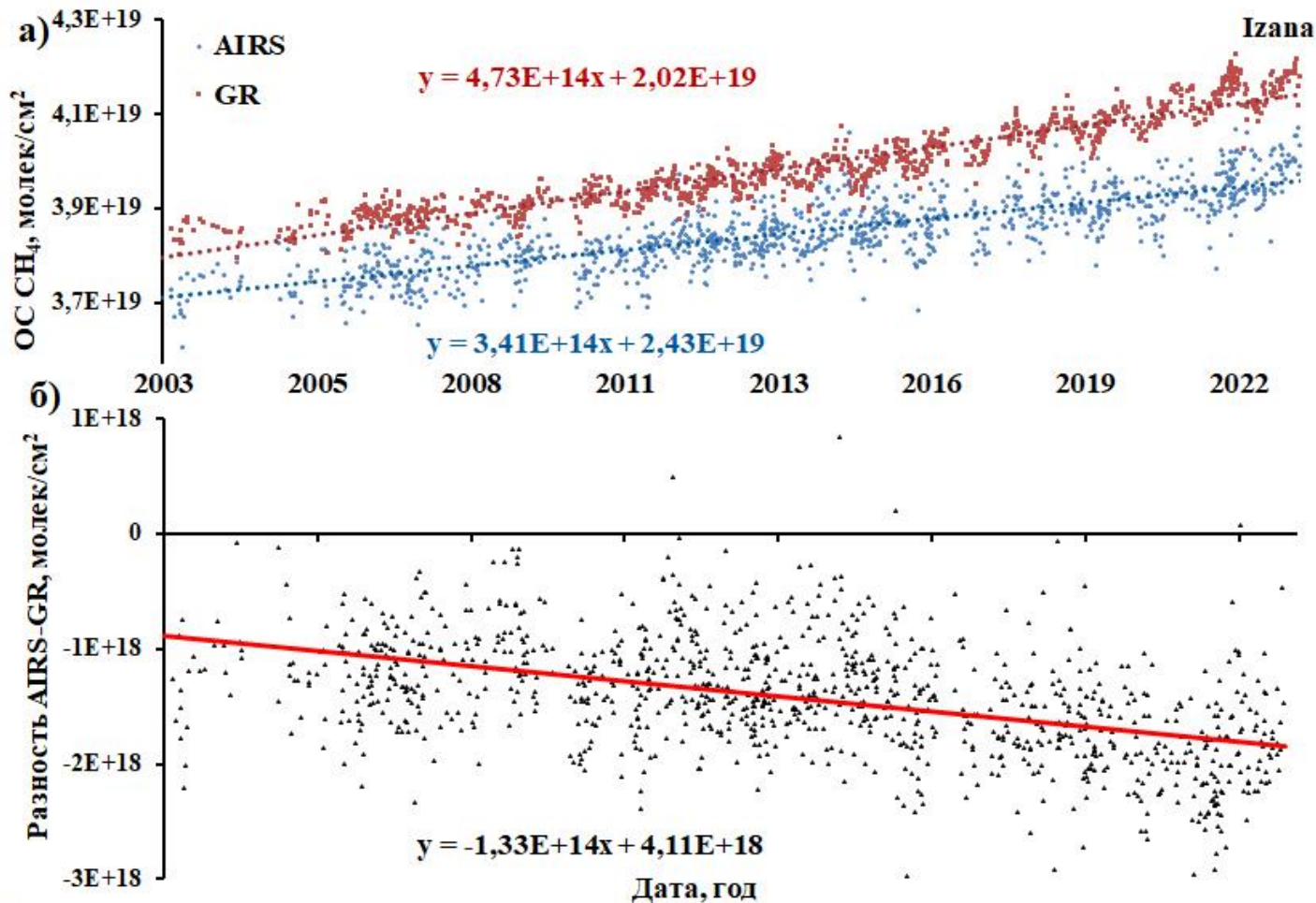
# Определение спутникового дрейфа «невязки» ОС CH<sub>4</sub>

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» отрицателен на всех исследуемых пунктах и определен как долговременной дрейф параметров спутникового прибора.



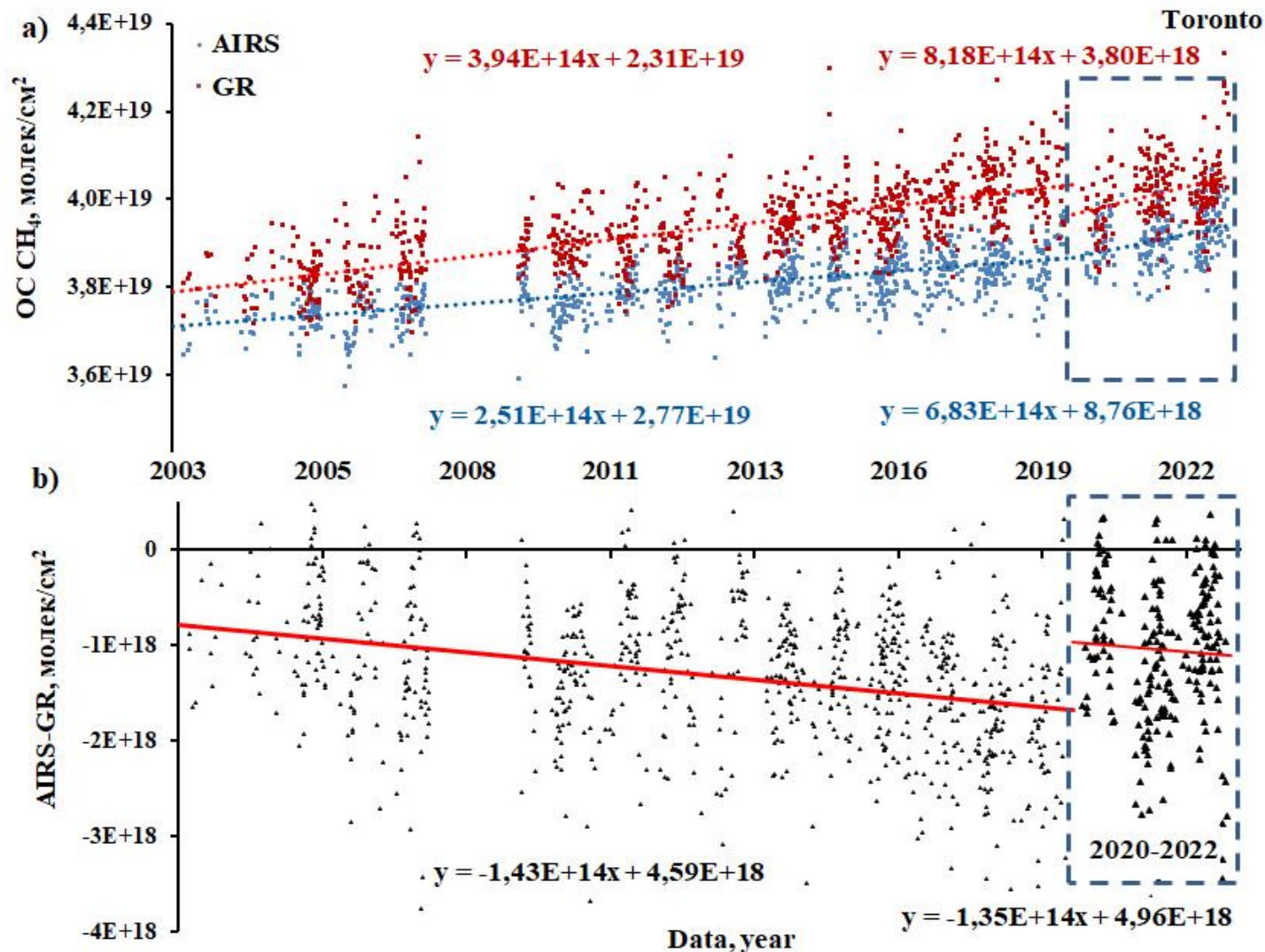
# Определение спутникового дрейфа «невязки» ОС $\text{CH}_4$

Установлены значимые изменения параметров соответствия орбитальных данных ОС  $\text{CH}_4$  AIRS Standard L3 v.6 IR AIRS Only Daily наземным наблюдениям станций NDAСС. Тренд «невязки» отрицателен на всех исследуемых пунктах и определен как долговременной дрейф параметров спутникового прибора.



# 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 NDAСС. Тренд «невязки» отрицателен на всех исследуемых пунктах и определен как долговременной дрейф параметров спутникового прибора.





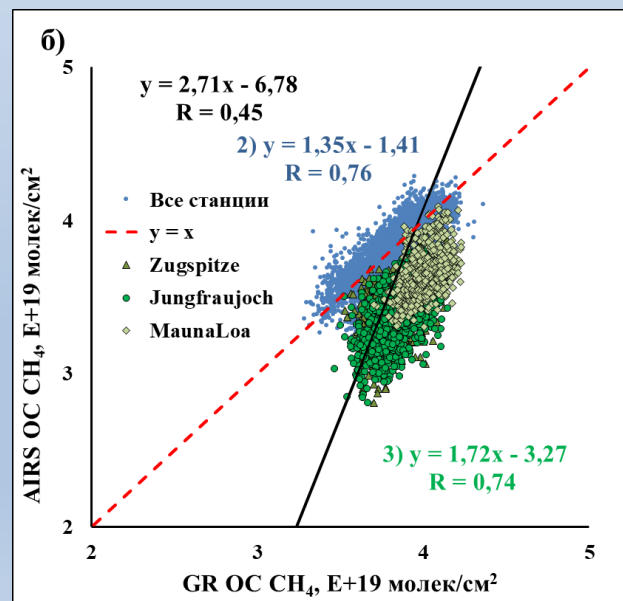
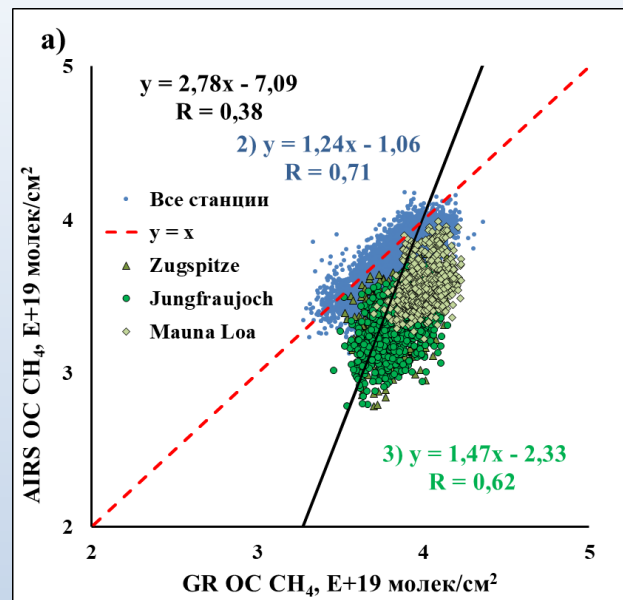
# Определение спутникового дрейфа «невязки»

Satellite spectrometer drift (SSD) =  $-1,67E+14$  молек/см<sup>2</sup> в сутки

Пункт измерений	Наклон тренда разности, молек/см <sup>2</sup> в сутки	Число пар
Eureka	$-2,02E+14 \pm 2,86E+13$	810
Ny Alesund	$-1,74E+14 \pm 2,98E+13$	412
Thule	$-1,07E+14 \pm 2,02E+13$	1027
Kiruna	$-1,34E+14 \pm 1,54E+13$	907
Harestua	$-1,98E+14 \pm 4,64E+13$	463
SPB	$-2,18E+14 \pm 3,02E+13$	859
Bremen	$-2,18E+14 \pm 3,30E+13$	404
Zugspitze	$-1,75E+14 \pm 2,76E+13$	1721
Jungfrauoch	$-1,40E+14 \pm 3,27E+13$	1441
Toronto*	$-1,43E+14 \pm 2,96E+13$	863
Rikubetsu	ND	364
Izana	$-1,33E+14 \pm 1,48E+13$	1081
Mauna Loa	$-2,11E+14 \pm 4,63E+13$	1079
Paramaribo	ND	121
Reunion Maida Maida	$-2,54E+14 \pm 5,64E+13$	542
Wollongong	$-8,13E+13 \pm 1,67E+13$	1963
Lauder	$-1,37E+14 \pm 1,81E+13$	1578
Arrival Heights	$-1,49E+14 \pm 5,06E+13$	492
<b>СРЕДНЕЕ</b>	<b><math>-1,67E+14 \pm 3,10E+13</math></b>	

# Параметры корреляции AIRS/GR

Пункт измерений	Исходные ряды, R	Скорректированные ряды, 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
SPB	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 Maido	0,46	0,59
Wollongong	0,69	0,78
Lauder	0,65	0,77
Arrival Heights	0,38	0,53



Общая корреляция исходных спутниковых и наземных измерений ОС CH<sub>4</sub>  
 а) до коррекции; б) после коррекции



# Параметры корреляции для высокогорных станций

Качество и особенности данных об общем содержании метана AIRS Only Ascending v.6 L3 для высокогорных пунктов измерений требуют дополнительного изучения. Для расположенных выше **1000 м н.у.м.** пунктов измерений спутник неверно определяет высотность.

1. **Izana & Reunion Maido.** Высота ячейки 1\*1° оценена спутником близкой к 0 м н.у.м. Станции ложатся в общий массив с другими пунктами измерений, корреляция в массиве:

-до коррекции  $R = 0,71$ ;

-после коррекции  $R = 0,76$ .

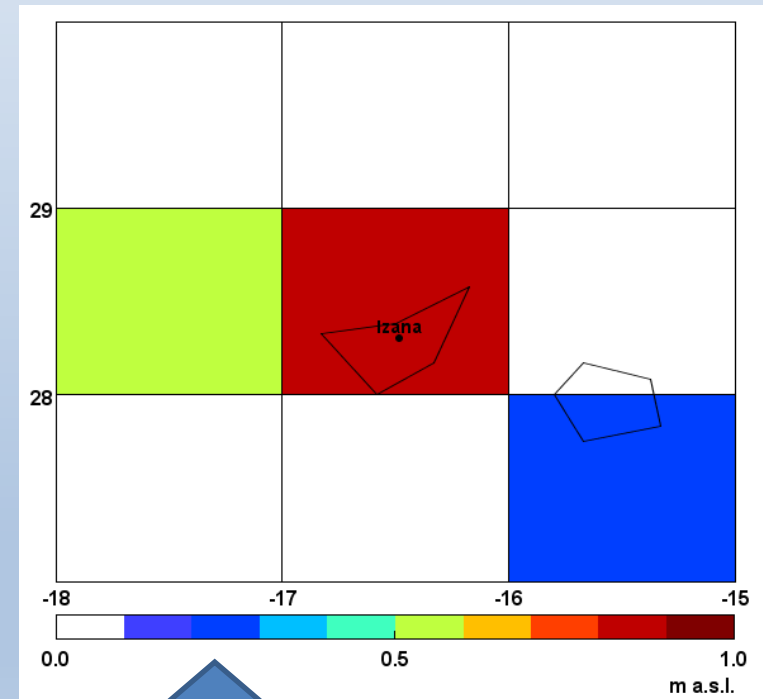
## **Zugspitze, Jungfraujoch, Mauna Loa**

Недооценка высоты, формируется отдельный массив. КК:

-до коррекции  $R = 0,62$ ;

-после коррекции  $R = 0,71$ .

№	Пункт измерений	Фактическая высота, м н.у.м.	Высота на основе AIRS, м н.у.м.
1	Zugspitze	2964	1264
2	Jungfraujoch	3580	1551
3	Izana	2367	1
4	Mauna Loa	3397	1301
5	Reunion Maido	2155	0



Переменная «Топография» AIRS

# Тренды ОС CH<sub>4</sub>

Пункт измерений	Исходный тренд, %/год			Тренд с учетом дрейфа, %/год	
	AIRS	GR	Δ, AIRS-GR	AIRS	Δ, 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	0,42±0,03	-0,01
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	0,44±0,04	-0,02
SPB	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	0,51±0,03	0,10
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	0,44±0,05	-0,06
Wollongong	0,33±0,02	0,39±0,01	-0,06	0,49±0,02	0,10
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>0,42±0,03</b>	



# Продукт ОС СО AIRS v.6

Другим анализируемым в ходе работы спутниковым продуктом стало ОС СО AIRS v6 Standard L3 Only Daily. Используются все парные значения. Методы фильтрации не применялись.

Определена величина наклона линейного тренда разности AIRS-GR. Наклон разности AIRS-GR имеет различную направленность, значительно варьируется по величине и на большинстве станций статистически не значим, так как

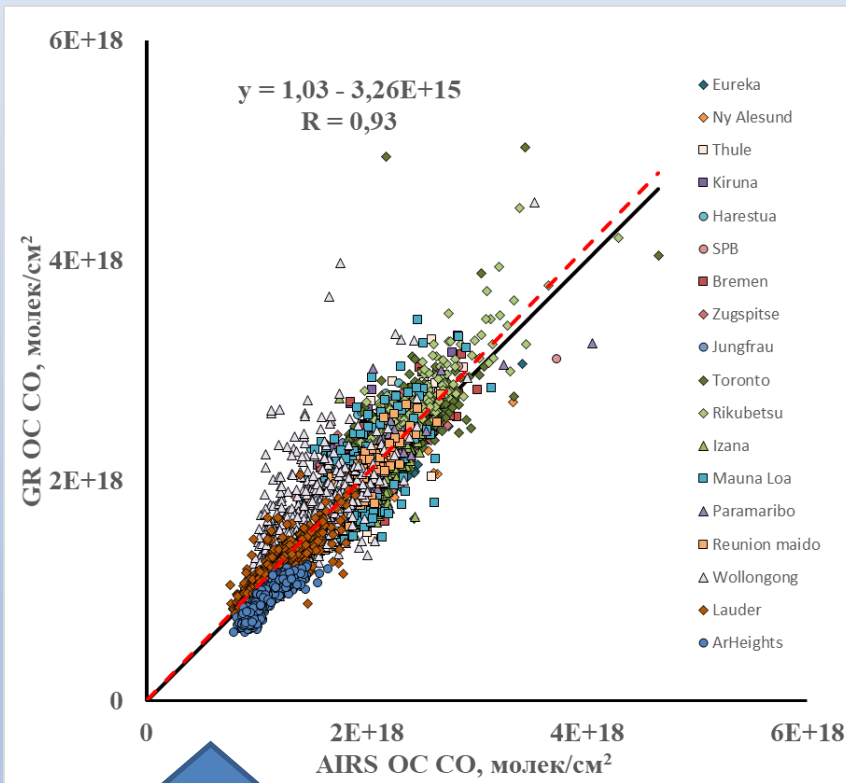
№	Пункт измерений	Наклон разности, молек/см <sup>2</sup> (×10 <sup>12</sup> )
1	Eureka	36,8±8,20
2	NY Alesund	19,2±5,61
3	Thule	30,3±3,28
4	Kiruna	10,1±3,72
5	Harestua	13,8±5,39
6	SPB	-4,89±5,25
7	Bremen	-1,33±6,12
8	Zugspitze	-5,59±1,99
9	Jungfrau	-10,9±2,78
10	Toronto	-3,93±4,45
11	Rikubetsu	-5,17±11,2
12	Izana	-1,88±3,16
13	Mauna Loa	-8,64±7,18
14	Paramaribo	-8,14±11,1
15	Reunion maido	0,76±8,95
16	Wollongong	6,28±3,80
17	Lauder	-7,81±1,96
18	Arrival Heights	-14,2±3,22

доверительный интервал превышает оцениваемую величину.

В данном случае уместнее говорить о систематической ошибке измерений в ту или иную сторону для каждой станции в отдельности, связанной со сложным комплексом факторов, которые включают в себя также особенности чувствительности спектрометра AIRS на различных высотах, в средних или высоких широтах и в различных условиях (фоновых или в загрязненной атмосфере), а также чувствительностью спутникового спектрометра AIRS к значимым антропогенным воздействиям, в т.ч. к выбросам от пожаров.

# Продукт ОС СО AIRS v.6

Наблюдается высокая корреляция исходных рядов (т.е. без удаления «артефактных» значений) наземных и спутниковых измерений между собой как постанционно (коэффициент корреляции  $R$  варьируется от 0,79 до 0,95), так и в общем массиве для всех исследуемых станций. Данные хорошо ложатся в единый массив, коэффициент наклона линии ортогональной регрессии которого близок к 1 и составляет 0,90.



Корреляция AIRS/ NDACC ОС СО для всех станций

Средний тренд, рассчитанный на основании всех использованных в исследовании станций наземных и спутниковых измерений совпадает между собой вплоть до десятой части доверительного интервала (AIRS -  $0,62 \pm 0,22$ ; GR -  $0,62 \pm 0,24$ ).

Таким образом, спутниковый продукт ОС СО AIRS v6 Standard L3 Only Daily является примером неприменимости разработанной и описанной выше методики, так как по ряду описанных выше причин валидация этих данных требует иного подхода.

## Продукт ОС СО AIRS v.6

№	Пункт измерений	R	Тренд AIRS, %/год	Тренд GR, %/год	$\Delta$ , AIRS-GR	Число пар сравнения
1	Eureka	0,80	-0,13±0,18	-0,84±0,26	0,70	777
2	NY Alesund	0,95	-0,79±0,24	-1,15±0,30	0,36	415
3	Thule	0,93	-0,60±0,10	-1,15±0,14	0,54	1315
4	Kiruna	0,92	-0,80±0,14	-0,93±0,16	0,13	752
5	Harestua	0,91	-1,19±0,20	-1,37±0,21	0,18	681
6	SPB	0,93	-0,89±0,25	-0,80±0,26	0,10	793
7	Bremen	0,90	-0,98±0,23	-0,93±0,22	0,05	428
8	Zugspitze	0,91	-0,78±0,10	-0,61±0,09	0,17	2137
9	Jungfrau	0,92	-1,11±0,15	-0,82±0,14	0,29	1219
10	Toronto	0,85	-0,87±0,14	-0,76±0,14	0,11	1479
11	Rikubetsu	0,93	-1,40±0,42	-1,21±0,43	0,19	352
12	Izana	0,88	-0,45±0,13	-0,43±0,13	0,01	1154
13	Mauna Loa	0,85	-0,95±0,26	-0,73±0,30	0,23	1278
14	Paramaribo	0,87	-0,89±0,39	-0,71±0,37	0,17	175
15	Reunion maido	0,94	1,27±0,59	1,23±0,62	0,04	818
16	Wollongong	0,79	-0,33±0,13	-0,48±0,16	0,15	2579
17	Lauder	0,89	-0,03±0,13	0,22±0,14	0,25	1695
18	Arrival Heights	0,90	-0,28±0,26	0,24±0,31	0,52	483
	СРЕДНЕЕ		<b>-0,62±0,22</b>	<b>-0,62±0,24</b>		

Оценки указывают на то, что данные ОС СО AIRS v.6 L3 достаточно хорошо отражают наблюдаемую картину

# Выводы

1. Установлены значимые изменения параметров соответствия орбитальных данных ОС CH<sub>4</sub> AIRS v.6 IR AIRS Only Daily наземным наблюдениям станций NDAСС.
2. Тренд «невязки» для ОС CH<sub>4</sub> с 2003 по 2022 гг. отрицателен на всех исследуемых пунктах и определен как долговременной дрейф параметров спутникового прибора.
3. Средний коэффициент наклона линии тренда невязки для ОС CH<sub>4</sub> в натуральном выражении определен как **1,67E+14** молек/см<sup>2</sup> в сутки.
4. Разработана и успешно применена методика динамической посуточной коррекции рядов ОС CH<sub>4</sub> орбитальных измерений.
5. Коррекция привела к значимому улучшению параметров корреляции между скорректированными орбитальными и наземными данными. Расхождение оценок трендов ОС CH<sub>4</sub> скорректированных орбитальных рядов с оценками на основе наземных измерений стало значительно меньше для каждой станции в отдельности и практически совпало в среднем по всем станциям: AIRS: **0,42±0,03** %/год; GR: **0,40±0,02**%/год, против исходной оценки AIRS **0,27±0,03** %/год.
6. Спутниковый продукт ОС CO AIRS v.6 IR Only Daily не требует коррекции. Тренд разности разнонаправлен и на большинстве пунктов измерений незначим. В исходных рядах наземных и спутниковых измерений наблюдается высокая корреляция (R варьируется от 0,79 до 0,95), а средний тренд всех станций наземных и спутниковых измерений совпадает между собой вплоть до десятой части доверительного интервала (AIRS **-0,62±0,22**; GR **-0,62±0,24**).



# Дополнительные материалы

С использованием информации о высоте станции, были определены коэффициенты пересчета данных к уровню моря  $C$ , рассчитанные следующим образом:

$$C = \frac{P}{P_0}, \text{ где:}$$

$P$  – атмосферное давление на уровне станции, мбар

$P_0$  – атмосферное давление на уровне моря, равное 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:

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

# Дополнительные материалы

**Satellite spectrometer drift (SSD) = -1,67E+14 молек/см<sup>2</sup> в сутки**

Коррекция спутниковых данных AIRS осуществлялась посуточно следующим образом:

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

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 спутникового спектрометра, равный 1,67E+14 молек/см<sup>2</sup>.

# Дополнительные материалы

Для исследования параметров соответствия спутниковых измерений наземным данным был использован регрессионный анализ (методы линейной и ортогональной регрессии). При описании распределения массива точек уравнения линейной и ортогональной регрессии выглядят одинаково:

$$y=ax+b,$$

где:

$a$  – коэффициент наклона (далее КН) регрессии

$b$  – коэффициент сдвига (свободный член) регрессии.

Метод ортогональной регрессии лучше подходит для определения зависимости двух измерительных рядов с неизвестным разбросом величин. Уравнение линейной регрессии математически моделирует неизвестную или зависимую переменную и известную или независимую переменную в виде линейного уравнения, поэтому оно наилучшим образом подходит для определения тренда ОС  $\text{CH}_4$  и тренда разности AIRS-GR на заданном временном отрезке.