

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

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

*Институт физики атмосферы имени А. М. Обухова РАН, Москва, 119017, Россия
E-mail: fedorova@ifaran.ru*

Работа посвящена валидации спутникового продукта AIRS v6 (*англ.* Atmospheric InfraRed Sounder version 6) по 12 наземным станциям мониторинговой сети NDACC (*англ.* Network for the Detection of Atmospheric Composition Change), период с 2003 по 2022 г. Используются данные об общем содержании (ОС) метана, полученные непосредственно прибором AIRS (вид данных IR AIRS Only). Цель работы заключалась в разработке методики коррекции орбитальных данных, имеющей универсальную применимость, улучшающей характеристики соответствия орбитальных данных наземным и увеличивающей точность оценок трендов состава и параметров атмосферы. Определено, что для всех исследованных станций линейный тренд разности спутниковых и наземных измерений (тренд невязки) ОС метана имеет отрицательное значение. Установленный эффект свидетельствует о наличии дрейфа параметров спутникового спектрометра. С использованием синхронизированных измерительных рядов измерений AIRS v6 и всех статистически обеспеченных данных станций рассчитана средняя величина дрейфа невязки ОС метана, равная $1,72 \cdot 10^{14}$ молекул/см² в день. Затем была реализована динамическая коррекция спутниковых данных с применением этого полученного среднего коэффициента. Проведено постанционное сравнение параметров корреляции среднедневных значений ОС метана и оценок трендов для орбитального прибора AIRS и наземных спектрометров NDACC до и после коррекции. Применение динамической коррекции к спутниковым данным привело к значительному улучшению соответствия обоих параметров. Так, оценки трендов ОС метана, рассчитанные на основе исходного орбитального ряда, оказались систематически ниже (в среднем в $\sim 1,5$ раза) по сравнению с оценками, полученными с использованием наземных данных. После применения динамической коррекции значения «спутниковых» и «наземных» трендов в большинстве пунктов измерений значительно сблизились. Средний по 12 пунктам тренд ОС метана для периода 2003–2022 гг. после коррекции по данным спутниковых измерений составил $0,45 \pm 0,03$ % в год, что хорошо соотносится с наземными оценками ($0,43 \pm 0,02$ % в год). Разработанная методика сопоставления и коррекции орбитальных данных применима к любым спутниковым долговременным наблюдениям.

Ключевые слова: состав атмосферы, дистанционное зондирование атмосферы, валидация, общее содержание, метан, наземные измерения, дрейф

Одобрена к печати: 07.10.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-33-47

Введение

Спутниковые наблюдения охватывают большие территории суши, морей и океанов и предоставляют экспериментальную информацию о составе и параметрах атмосферы в труднодоступных и малонаселённых районах, т.е. там, где пункты наземного мониторинга отсутствуют. Орбитальные данные дистанционного зондирования широко используются различными исследовательскими коллективами при решении задач изучения динамики состава атмосферы и климата, вариативности и переноса парниковых газов и климатически активных веществ в атмосфере в разных регионах Земли.

На данный момент на околоземной орбите находится большое число научных спутников, таких как Terra (<https://terra.nasa.gov>), Aqua (<https://aqua.nasa.gov>), Aura (<https://aura.gsfc.nasa.gov>), Sentinel 5P (https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-5P), аппараты серии OCO (*англ.* Orbiting Carbon Observatory) (Eldering et al., 2017;

Orbiting..., 2019) и др., оснащённых различными орбитальными приборами и предоставляющих большой объём информации о составе и параметрах атмосферы и поверхности Земли. По своему совершенству, характеристикам и времени нахождения на орбите эти приборы можно условно разделить на приборы старшего поколения (или так называемые долголетающие) и приборы высокого пространственного разрешения (или современные орбитальные системы). Например, MOPITT (*англ.* Measurement Of Pollution In The Troposphere), MODIS (*англ.* MODerate resolution Imaging Spectroradiometer), AIRS (*англ.* Atmospheric InfraRed Sounder), OMI (*англ.* Ozone Monitoring Instrument) выведены на орбиту на рубеже нового тысячелетия и исправно предоставляют информацию о составе и параметрах атмосферы уже в течение двух и более десятилетий (в зависимости от прибора). Эти орбитальные системы мониторинга — долголетающие.

Несмотря на отдельные недостатки (например, относительно невысокое пространственное разрешение), приборы старшего поколения незаменимы при оценке региональных и глобальных долговременных изменений состава атмосферы, в особенности в районах земного шара, не охваченных наземными сетями мониторинга. К достоинствам этих орбитальных приборов также следует отнести тщательную многоплановую валидацию измерительных данных, выполненную многими исследовательскими коллективами (Груздев, Елохов, 2023; Jiang et al., 2017; Yurganov et al., 2008).

Так, инфракрасный зондировщик AIRS (<https://airs.jpl.nasa.gov>), оснащённый гиперспектральным прибором (подробнее о спектрометре <https://airs.jpl.nasa.gov/mission/airs-project-instrument-suite/airs/spectrometer-optics>) с 2378 инфракрасными каналами, — это один из шести инструментов, установленных на борту спутника NASA (*англ.* National Aeronautics and Space Administration) Aqua, запущенного 4 мая 2002 г. Он управляется Лабораторией реактивного движения (*англ.* Jet Propulsion Laboratory) NASA в Пасадене, Калифорния.

Космический аппарат AIRS предназначен для поддержки исследований климата и улучшения качества прогнозирования погоды. Кроме метеорологических параметров, с помощью этого прибора проводятся измерения содержания и концентрации отдельных атмосферных примесей; AIRS использует инфракрасную технологию для создания трёхмерных карт температуры воздуха и поверхности, водяного пара и свойств облаков, а также измеряет содержание парниковых газов, таких как озон, окись углерода, диоксид углерода и метан. 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. Таким образом, измерениями охвачено более 80 % поверхности Земли (Aumann et al., 2003).

Спутник Aqua является частью группы аппаратов NASA A-train (*англ.* Afternoon Train), летающих на низких полярных орбитах на высоте около 700 км над Землёй; они совершают 14 полных оборотов в день, облетая вокруг Земли. Спутник покрывает поверхность земного шара в диапазоне от -180 до $+180^\circ$ долготы и от -90 до $+90^\circ$ широты.

Aqua на каждом своём витке пересекает экватор приблизительно в 01:30 и 13:30 по местному времени. Корреляция измеренного AIRS дневного общего содержания (ОС) метана (CH_4) с наземными данными достаточно высока: коэффициент корреляции (КК) R находится в диапазоне приблизительно от 0,6 до 0,8 в большинстве пунктов проводимых сопоставлений (Rakitin et al., 2015), но анализируемые в этой работе данные не охватывают период после 2013 г. Данные AIRS о составе атмосферы успешно используются при оценке эмиссий разных примесей, например, выбросов CO от природных пожаров (Krol et al., 2013; Yurganov, Rakitin, 2022; Yurganov et al., 2011), а также при изучении трендов состава атмосферы (Rodionova, 2022; Rakitin et al., 2020; Reddy, Taylor, 2022). В связи с отсутствием альтернативы в плане исследования распределения трендов состава атмосферы (измерительные ряды других, более современных космических средств мониторинга значительно короче) учёные продолжают валидационные работы и применение данных измерений долголетающих спутниковых систем.

Для пользователей доступны различные уровни продуктов: 1, 2, 3 (*англ.* Level 1, 2, 3 — L1, L2, L3) разных версий (новейшая — седьмая (*англ.* version 7)). Ежедневный продукт уровня L3

использует данные со всех витков и усредняет их по соответствующим ячейкам всей земной поверхности. Уровни и структура данных подробнее описаны в руководстве (AIRS/AMSU/HSB..., 2017). Продукты L3 наиболее адаптированы для применения и изготовлены на основе информации L2, которая прошла контроль качества, была отфильтрована, распределена по ячейкам сетки $1 \times 1^\circ$ и содержит средние значения, стандартное отклонение и количество данных L2 для каждой ячейки и для всех измеряемых параметров.

К недостаткам AIRS (а также других приборов старшего поколения, таких как MOPITT и IASI (*англ.* Infrared Atmospheric Sounding Interferometer)) относится, как правило, не только невысокое пространственное разрешение, но и невысокая чувствительность в нижней тропосфере, что приводит к недооценке содержания примеси в условиях интенсивной поверхностной эмиссии (например, в районах мегаполисов и природных пожаров) (Rakitin et al., 2015; Yurganov et al., 2011; Wang et al., 2018). Кроме того, в ранних работах нами было замечено, что долготелетающий AIRS занижает (до 1,5 раза) оценки трендов ОС CH_4 по сравнению с оценками, полученными на основе наземных данных (Rakitin et al., 2020). Это последнее обстоятельство позволило предположить, что параметры орбитального прибора со временем изменяются, что и приводит к упомянутому занижению, а также, по-видимому, и к ухудшению характеристик соответствия информации AIRS наземным измерениям. Целью настоящей работы стала проверка этого предположения на примере ОС CH_4 , а также разработка методов коррекции орбитальных данных, связанных с долговременными изменениями качества спутниковых наблюдений.

Методы и измерительные данные

В работе валидируются орбитальные данные ОС CH_4 продукта AIRS v6 Standard L3 IR AIRS Only Ascending за период с 2003 по 2022 г. для 12 точек, соответствующих расположению пунктов наблюдений сети атмосферного мониторинга NDACC (*англ.* Network for the Detection of Atmospheric Composition Change, <https://ndacc.larc.nasa.gov>). При этом координаты каждого наземного пункта являются центром ячейки спутниковых измерений $1 \times 1^\circ$.

Валидируемый продукт AIRS Only v6 L3 находится в открытом доступе на сайте NASA (<https://airs.jpl.nasa.gov/data/get-data/standard-data>). Данные спутникового спектрометра AIRS для каждой станции были извлечены из первичных файлов формата .hdf с помощью специального программного пакета TROPOMI tools (*англ.* TROPospheric Monitoring Instrument tools) собственной разработки (Rakitin et al., 2023). Использовались данные только дневных измерений AIRS (с восходящей орбиты, *англ.* ascending only), т. е. около 13:30 местного времени для каждой ячейки и каждого дня, что (как правило) совпадает со временем наземных спектроскопических измерений с точностью 2–3 ч. Описание применённого спутникового продукта отражено в *табл. 1*.

В качестве эталонных значений ОС CH_4 приняты данные спектроскопических измерений станций NDACC тех пунктов сети, которые оснащены солнечными фурье-спектрометрами высокого разрешения и при этом имеют длительные ряды измерений (De Mazière et al., 2018). Точность единичного измерения содержания газа в толще атмосферы этих спектрометров оценивается как 0,1–5 % в зависимости от атмосферной примеси (Тимофеев и др., 2020; Flores et al., 2013; Hase et al., 2012), а при измерениях содержания метана — 1 % (Тимофеев и др., 2020).

Таблица 1. Информация о версии, кодировке и периоде анализа спутникового продукта ОС CH_4 орбитального спектрометра AIRS

Параметр	Спутниковый продукт	Кодировка	Переменная для извлечения	Годы
ОС CH_4	AIRS Standard L3 v6 IR AIRS Only Daily	AIRS3STD	Variable TotCH ₄ _A* Общее содержание в столбе CH_4 , разрешение $1 \times 1^\circ$, молекул/см ²	2003–2022

* A (*англ.* Ascending) — только восходящая часть орбиты.



Рис. 1. Географическое расположение станций мониторинговой сети NDAAC на карте. На вкладке в левом нижнем углу приведено расположение европейских станций в увеличенном масштабе

Таблица 2. Перечень задействованных в анализе станций сети NDACC с указанием анализируемых периодов; их географическое расположение, высота над уровнем моря (н. у. м.), коэффициент перевода данных к уровню моря С и число пар сравнений

№	Пункт измерений	Широта, долгота	Высота, м н. у. м.	Коэф. С	Годы	Число пар
1	Kiruna, Швеция	67,8° с. ш., 20,4° в. д.	419	0,949	2003–2022	907
2	Harestua, Норвегия	60,2° с. ш., 10,8° в. д.	596	0,928	2009–2020	462
3	St. Petersburg, РФ	59,9° с. ш., 29,8° в. д.	20	0,997	2009–2022	859
4	Bremen, Германия	53,1° с. ш., 8,8° в. д.	27	0,997	2003–2022	356
5	Zugspitze, Германия	47,4° с. ш., 11,0° в. д.	2964	0,690	2003–2022	1721
6	Jungfrauoch, Швейцария	46,5° с. ш., 8,0° в. д.	3580	0,638	2003–2022	1441
7	Toronto – ТАО, Канада	43,7° с. ш., 79,4 з. д.	174	0,978	2003–2019*	863
8	Izana, о. Тенерифе, Испания	28,3° с. ш., 16,5° з. д.	2367	0,743	2003–2022	1082
9	Mauna Loa, шт. Гавайи, США	19,5° с. ш., 155,9° з. д.	3397	0,653	2003–2022	1082
10	Reunion Maito, Франция	21,1° ю. ш., 55,4° в. д.	2155	0,763	2013–2019	542
11	Wollongong, Австралия	34,4° ю. ш., 150,9° в. д.	30	0,996	2003–2022	1963
12	Lauder, Новая Зеландия	45,0° ю. ш., 169,7° в. д.	370	0,955	2003–2021	1578

* В пункте Toronto – ТАО, Канада, данные измерений ОС CH₄ доступны по 2022 г. включительно. Однако в последние годы (начиная с 2020-го) наблюдения этой станции по метану вызывают вопросы (см. дополнительно рис. 3ж). При первоначальной оценке качества данных в Toronto был обнаружен резкий сдвиг («ступенька») измерительного ряда, произошедший в 2020 г. В рамках данной работы для этого пункта в расчёте был использован более короткий временной ряд ОС CH₄ (с 2003 по 2019 г. включительно).

На *рис. 1* (см. с. 36) приведено фактическое расположение станций на карте: Кируна (*англ.* Kiruna); Харестуа (*англ.* Harestua); Санкт-Петербург (*англ.* St. Petersburg); Бремен (*англ.* Bremen); Цугшпитце (*англ.* Zugspitze); Юнгфрауйох (*англ.* Jungfraujoeh); Торонто – ТАО, (*англ.* Toronto – TAO; Атмосферная обсерватория Университета Торонто, *англ.* Toronto Atmospheric Observatory – TAO); Изана (*англ.* Izana); Мауна-Лоа (*англ.* Mauna Loa); о. Реюньон, обсерватория Майдо (*англ.* Reunion Maido); Вуллонгонг (*англ.* Wollongong); Лаудер (*англ.* Lauder). Перечень станций, особенности их расположения и число пар сопоставления (спутник/ наземный прибор – AIRS/GR (*англ.* ground)) можно найти в *табл. 2*.

На первом этапе исследований были выделены станции NDACC, имеющие наиболее длительные, равномерные и статистически обеспеченные измерительные ряды, по периоду совпадающие с рядами данных спутникового спектрометра AIRS. Высокоширотные станции, такие как Юрика (*англ.* Eureka) (80,0° с. ш., 86,4° з. д.), Нью-Óлесунн (*англ.* Ny Alesund) (78,9° с. ш., 11,9° в. д.), Зуль (*англ.* Thule) (76,5° с. ш., 68,7° з. д.) и Арривал-Хайтс (*англ.* Arrival Heights) (77,8° ю. ш., 166,7° в. д.), а также пункты Парамарибо (*англ.* Paramaribo) (5,8° с. ш., 55,2° з. д.) и Рикубецу (*англ.* Rikubetsu) (43,5° с. ш., 143,8° в. д.) были исключены из анализа в связи с недостаточной обеспеченностью и равномерностью измерительных рядов.

После выбора станций ряды ОС CH₄ каждого наземного пункта NDACC и орбитального спектрометра AIRS были синхронизированы, т. е. были отобраны пары среднедневных значений. Таким образом, использовались только дни, когда измерения в каждой точке велись и наземным прибором, и орбитальным спектрометром, по аналогии с исследованием (Rakitin et al., 2020).

Поскольку данные NDACC об ОС примесей даются для той высоты, на которой расположен конкретный прибор, а продукт AIRS Standard L3 v6 IR AIRS Only Daily предоставляет величину этого параметра для уровня моря, то для корректного сопоставления рядов и определения величины разности AIRS – GR в натуральном выражении необходимо было привести данные наземных измерений к уровню моря посредством применения барометрической формулы (Хргиан, 1969). Для этого с использованием информации о высоте станции были определены коэффициенты пересчёта C , отражённые в *табл. 2* и рассчитанные следующим образом:

$$C = \frac{P}{P_0},$$

где P — атмосферное давление на уровне станции, мбар; P_0 — атмосферное давление на уровне моря, равное 1013 мбар.

Давление на уровне станции вычисляется по формуле:

$$P_h = P_0 \exp\left[-Mg \frac{h-h_0}{kT}\right],$$

где P_h — 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, К; M — молярная масса воздуха; g — ускорение свободного падения.

Таким образом получаем коэффициент перевода значения ОС в столбе к уровню моря:

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

Наземные данные пунктов измерений сети NDACC находятся в свободном доступе. Стоит заметить, что информация по отдельным пунктам поступает в базы данных сети Интернет не всегда регулярно: некоторые станции предоставляют результаты измерений почти в реальном времени, другие с задержкой в год или более, что также обуславливает выбор периода для анализа с 2003 по 2022 г.

К наземным и спутниковым рядам данных методы исключения выбросов (фильтрация случайных значений) не применялись, т. е. использовались все суточные значения, кроме нескольких нереалистичных, а именно $1,95 \cdot 10^{19}$ молекул/см² в исходных рядах наземных данных пунктов измерений Bremen и Ny Alesund (NDACC).

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 (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 CH_4 и тренда разности AIRS – GR на заданном временном отрезке. При этом, если КК между сопоставляемыми данными близок к 1, то как линейная, так и ортогональная регрессия будут представлять схожие достоверные результаты. Чем меньше коэффициент корреляции, тем больше будет угол между графическими отображениями линейной и ортогональной регрессии и тем большую физическую ошибку зависимости будет отражать уравнение простой линейной регрессии. В связи с этим при оценке параметров корреляции мы использовали именно ортогональный регрессионный анализ, а для определения тренда с временной зависимостью — линейную регрессию.

Результаты и обсуждения

В процессе предварительного анализа выяснилось, что для ОС CH_4 за период с 2003 по 2022 г. визуально выделяется расхождение со временем спутниковых и наземных рядов данных для всех исследуемых пунктов (отличия в коэффициенте наклона, т.е. в величине линейного тренда), что отмечалось и ранее (Rakitin et al., 2020), см. дополнительно пример, представленный на рис. 2.

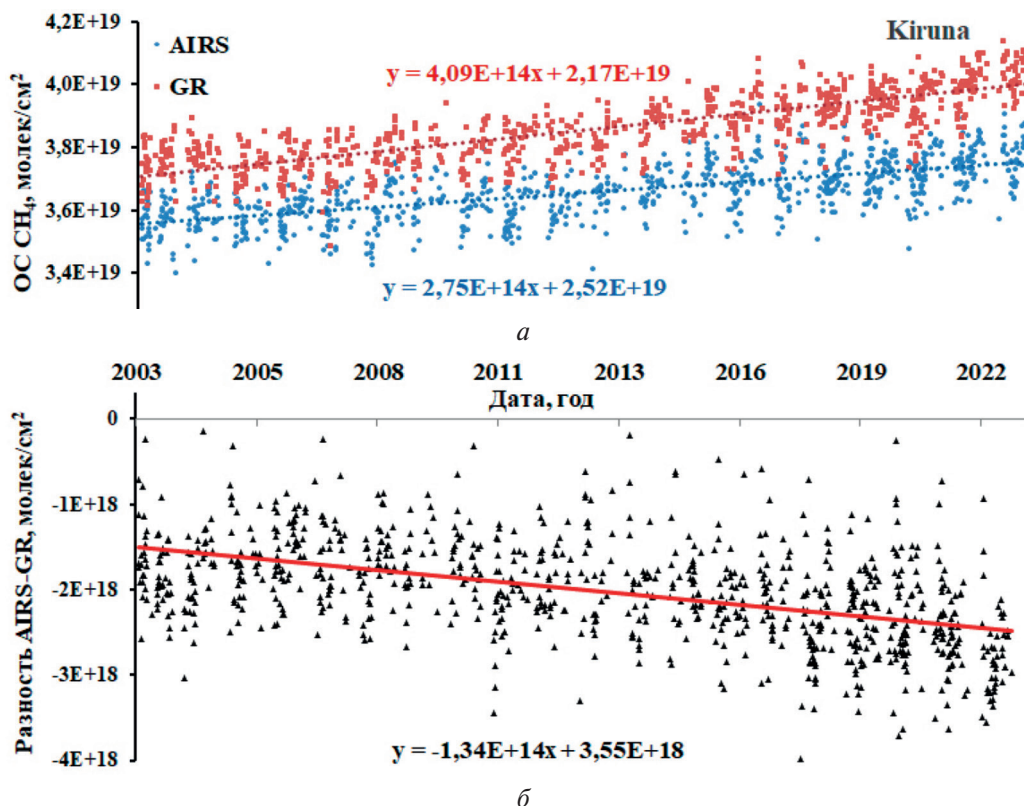


Рис. 2. Тренды и определение дрейфа невязки на примере пункта измерений Kiruna за 2003–2022 гг.: а — средние значения и линейные тренды ОС CH_4 по данным AIRS и наземного прибора станции GR (англ. ground); б — средние значения разности ОС CH_4 AIRS – GR (в молекул/см²)

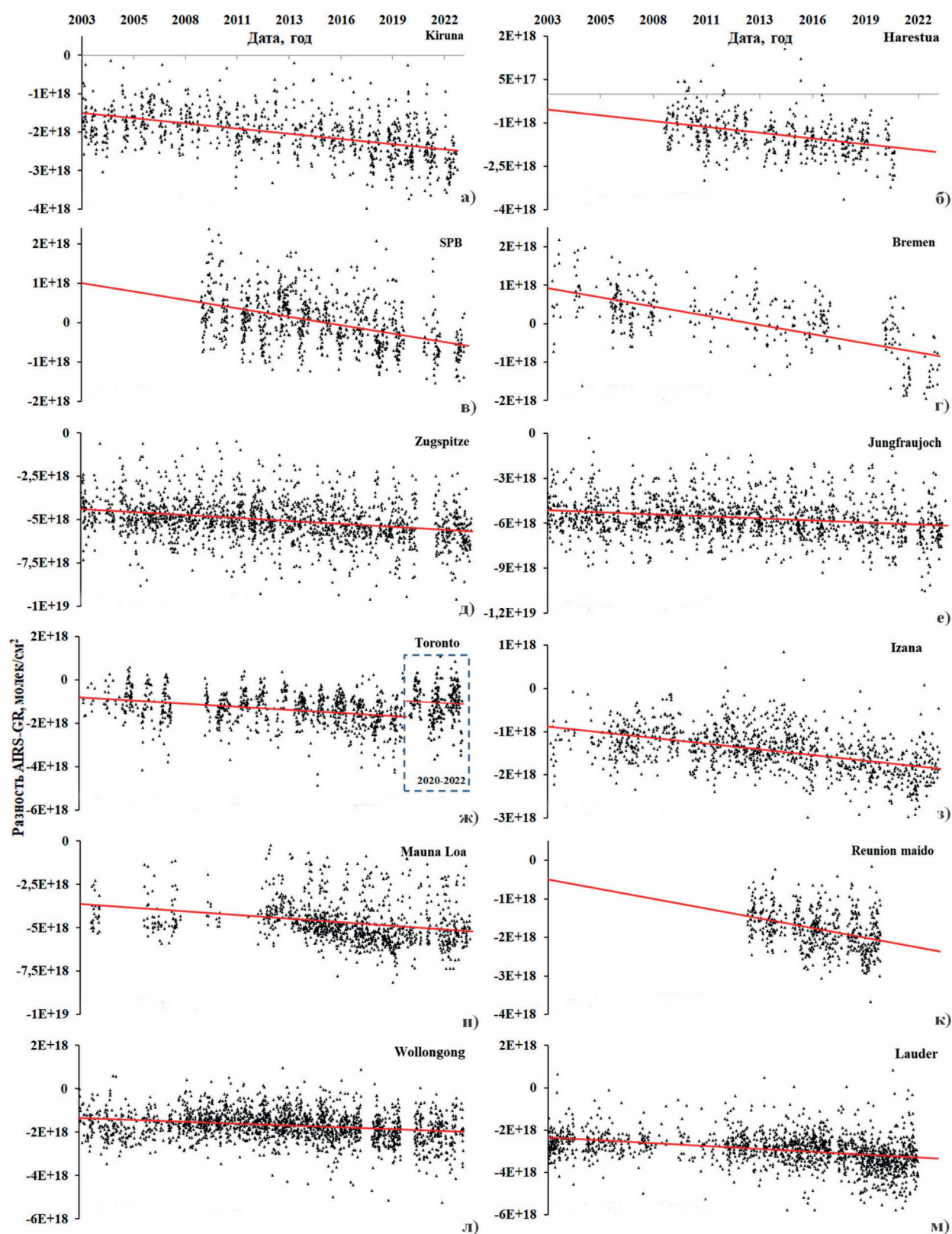


Рис. 3. Тренд разности AIRS – GR (дрейф невязки) спутниковых и наземных измерений ОС CH_4 за 2003–2022 гг. для всех исследуемых пунктов (в молекул/см²): а – Kiruna; б – Harestua; в – SPB (St. Petersburg); г – Bremen; д – Zugspitze; е – Jungfraujoch; ж – Toronto; з – Izana; и – Mauna Loa; к – Reunion Maido; л – Wollongong; м – Lauder

Рассчитанный для всех пунктов измерений за доступные периоды линейный тренд разности ОС CH_4 (AIRS – GR) приведён в размерность [молекул·см⁻²·сут⁻¹±95%-й доверительный интервал] и отражён в *табл. 3* и на *рис. 3* (см. с. 39). Во всех анализируемых пунктах измерений величины тренда отрицательные и близкие по значению, что указывает на изменение параметров спектрометра AIRS со временем. Наблюдаемую картину можно охарактеризовать как выраженный и стабильный однонаправленный дрейф показаний спутникового прибора, что требует коррекции данных AIRS и проведения последующего сопоставления с целью оценки качества полученного результата.

Стоит отметить, что дрейф спутникового прибора отражается на параметрах соответствия как для рядов среднесуточных значений, так и для помесечного усреднения. К тому же на всех исследуемых пунктах спутниковый прибор систематически занижает абсолютные значения (пример — *рис. 2a*) и, вместе с ними, оценки тренда (примерно в 1,5 раза) относительно результатов, полученных на основе наземных наблюдений.

Таблица 3. Коэффициент наклона линейной регрессии (суточный дрейф невязки) и ±95%-й доверительный интервал для разности AIRS – GR ОС CH_4 для каждого пункта измерений

№	Пункт измерений	Наклон тренда разности, ×10 ¹³ молекул/см ²	№	Пункт измерений	Наклон тренда разности, ×10 ¹³ молекул/см ²
1	Kiruna	(-13,4±1,54)	7	Toronto	(-14,3±2,96)
2	Harestua	(-19,8±4,50)	8	Izana	(-13,3±1,48)
3	St. Petersburg	(-21,8±3,02)	9	Mauna Loa	(-21,4±4,63)
4	Bremen	(-24,2±2,97)	10	Reunion Maito	(-25,4±5,64)
5	Zugspitze	(-17,5±2,76)	11	Wollongong	(-8,13±1,67)
6	Jungfraujoch	(-14,0±3,27)	12	Lauder	(-13,7±1,81)
	<i>Среднее</i>			(-17,2±3,02)	

С целью проведения общей и универсальной коррекции орбитальных рядов было рассчитано среднее значение дрейфа невязки спутниковых данных ОС CH_4 в сутки для отрезка с 2003 по 2022 г. — SSD (*англ.* satellite spectrometer drift), равное $(17,2±3,02) \cdot 10^{13}$ молекул/см² в сутки (см. *табл. 3*). В дальнейшем ряд данных спутниковых измерений AIRS v6 L3 был динамически скорректирован (т. е. посуточно) на величину дрейфа невязки начиная с 01.01.2003 г. Коррекция осуществлялась следующим образом: $\text{ОС } \text{CH}_4 \text{ SSD} = \text{ОС } \text{CH}_4 + (N - 1) \cdot \text{SSD}$, где ОС $\text{CH}_4 \text{ SSD}$ — скорректированное посуточное спутниковое значение ОС CH_4 , молекул/см²; ОС CH_4 — общее содержание CH_4 , молекул/см² по данным AIRS v6 L3; N — порядковый номер дня, начиная с 01.01.2003; SSD — коэффициент дрейфа спутникового спектрометра, равный $17,2 \cdot 10^{13}$ молекул/см².

Полученные новые (скорректированные) ряды спутниковых измерений в дальнейшем были использованы для определения параметров корреляции с наземными данными, а также для оценки трендов ОС CH_4 на различных временных отрезках (2003–2022, 2008–2022). Параметры корреляции между орбитальными и наземными измерениями, полученные для каждого пункта до и после коррекции, представлены в *табл. 4*.

Применение данной методики положительно повлияло на корреляцию исследуемых рядов орбитальных и наземных данных. На всех станциях после введения динамической поправки наблюдается увеличение коэффициента R , в том числе в тех пунктах, где корреляция была исходно высока (см. *табл. 4*). Относительно невысокая корреляция ($R \sim 0,4–0,5$), отмеченная на первоначальных рядах четырёх высотных станций (Zugspitze, Jungfraujoch, Mauna Loa и Reunion Maito), выросла после коррекции до 0,5–0,6. На равнинных станциях, а также в пункте Izana корреляция увеличилась до 0,7–0,9. Более низкий КК на высотных станциях может объясняться погрешностью при приведении измеряемой величины ОС к уровню моря, а также погрешностью самих спутниковых измерений, связанных с неопределённостью ввиду большой высоты и сложного рельефа поверхности в районе этих станций.

Таблица 4. Коэффициент корреляции R и уравнения ортогональной регрессии для различных станций без применения коэффициента дрейфа к спутниковым данным и с его применением для всех доступных пар за исследуемый период

№	Пункт измерений	Исходные ряды		Скорректированные ряды	
		Корреляция, R	Уравнение ортогональной регрессии	Корреляция, R	Уравнение ортогональной регрессии
1	Kiruna	0,84	$0,78x + 6,54 \cdot 10^{18}$	0,90	$1,07x - 4,07 \cdot 10^{18}$
2	Harestua	0,69	$1,20x - 1,22 \cdot 10^{19}$	0,75	$0,91x + 2,63 \cdot 10^{18}$
3	St. Petersburg	0,69	$0,85x + 5,70 \cdot 10^{18}$	0,78	$1,06x - 1,53 \cdot 10^{18}$
4	Bremen	0,81	$0,62x + 1,48 \cdot 10^{19}$	0,88	$0,89x + 4,97 \cdot 10^{18}$
5	Zugspitze	0,48	$1,32x - 1,74 \cdot 10^{19}$	0,62	$1,53x - 2,49 \cdot 10^{19}$
6	Jungfrauoch	0,47	$1,39x - 2,08 \cdot 10^{19}$	0,58	$1,61x - 2,85 \cdot 10^{19}$
7	Toronto	0,58	$0,56x + 1,61 \cdot 10^{19}$	0,67	$0,89x + 3,72 \cdot 10^{18}$
8	Izana	0,83	$0,81x + 6,15 \cdot 10^{18}$	0,90	$1,14x - 6,51 \cdot 10^{18}$
9	Mauna Loa	0,36	$2,02x - 4,57 \cdot 10^{19}$	0,49	$2,01x - 4,44 \cdot 10^{19}$
10	Reunion Maido	0,46	$1,36x - 1,63 \cdot 10^{19}$	0,59	$1,52x - 2,16 \cdot 10^{19}$
11	Wollongong	0,69	$1,04x - 3,34 \cdot 10^{18}$	0,79	$1,38x - 1,53 \cdot 10^{19}$
12	Lauder	0,66	$1,08x - 6,05 \cdot 10^{18}$	0,77	$1,36x - 1,58 \cdot 10^{19}$

Качество и особенности данных об ОС метана AIRS Only Ascending v6 L3 требуют дополнительного изучения. При исследовании параметров соответствия спутниковых измерений наземным (табл. 5) наихудшей корреляцией (что до применения коррекции, что после неё) выделяются высокогорные станции, расположенные выше 1000 м н.у.м. (за исключением пункта Izana), для которых спутник неверно определяет высотность.

Таблица 5. Различия между фактической высотой пунктов измерений NDACC и данными о высоте, полученными на основе наблюдений AIRS

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

Для трёх наиболее высотных пунктов измерений (Zugspitze, Jungfrauoch, Mauna Loa) наблюдается существенная недооценка спутником высоты размещения, связанная со сложной топографией в их окрестности, что может вносить ошибку в спутниковые оценки ОС CH_4 в некоторых районах при применении универсального вертикального профиля распределения метана. В то же самое время эти три станции следует отнести к континентальным, т.е. расположенным на суше (станция Mauna Loa размещается в центре большого острова, и ячейка $1 \times 1^\circ$, в центре которой находится этот пункт, практически полностью относится к суше). Измерительные ряды этих станций плохо вписываются в общий массив (рис. 4, см. с. 42) и впоследствии были исключены из определения общей корреляции.

Если оценить высоту расположения ячейки $1 \times 1^\circ$, в центре которой размещается рассматриваемый пункт измерений, то по данным AIRS L3 о топографии (переменная Topography) для станций мониторинга Izana и Reunion Maido эта величина близка к уровню моря, в то время как станции являются высокогорными (см. табл. 5). Они находятся соответственно

на высоте 2367 и 2155 м на небольших (около 50 км в ширину) островах, окружённых морем. Так как координаты пунктов измерения для спектрометра AIRS являются центрами ячейки $1 \times 1^\circ$, то при усреднении высоты по всей площади возникает ошибка определения параметра. При этом вертикальный профиль пересчёта спутниковых значений к уровню моря, предположительно, в этих ячейках применяться не должен, но несмотря на это, ряды измерений, полученные на двух этих станциях, вполне успешно ложатся в общий массив вместе с другими исследуемыми пунктами измерений (рис. 5а).

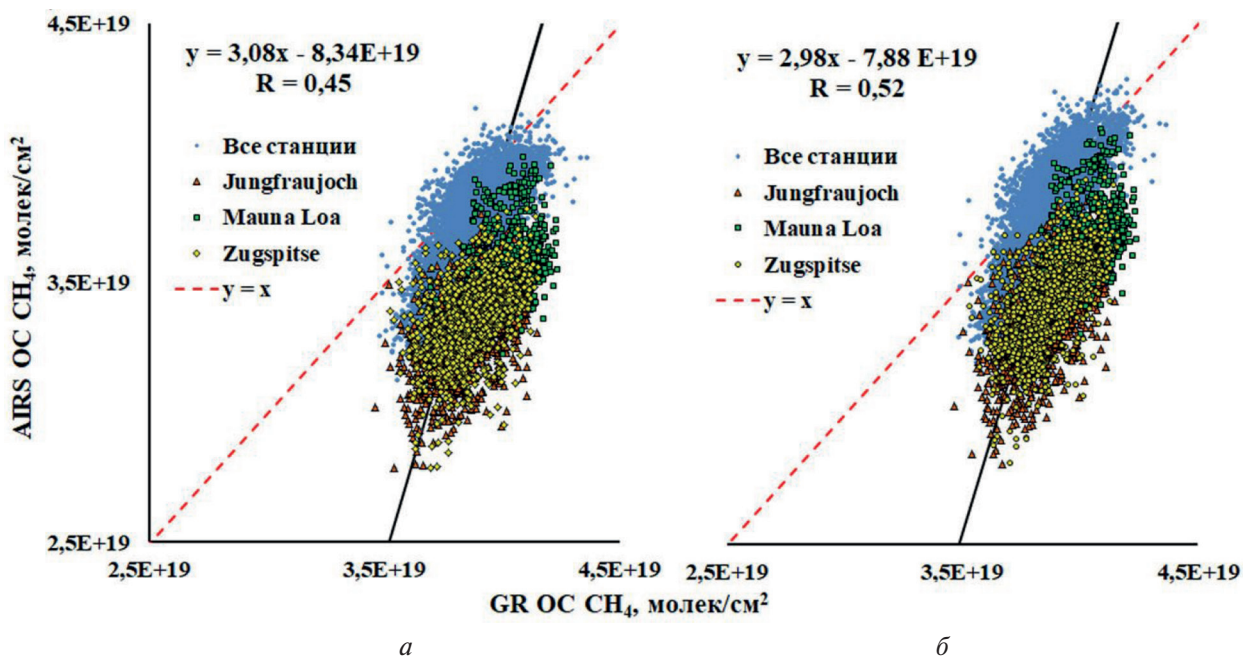


Рис. 4. Результаты сопоставления дневных данных AIRS v6 L3 с наземными измерениями CO_2 за 2003–2022 гг. для всех 12 станций NDACC: а — исходные ряды; б — после коррекции

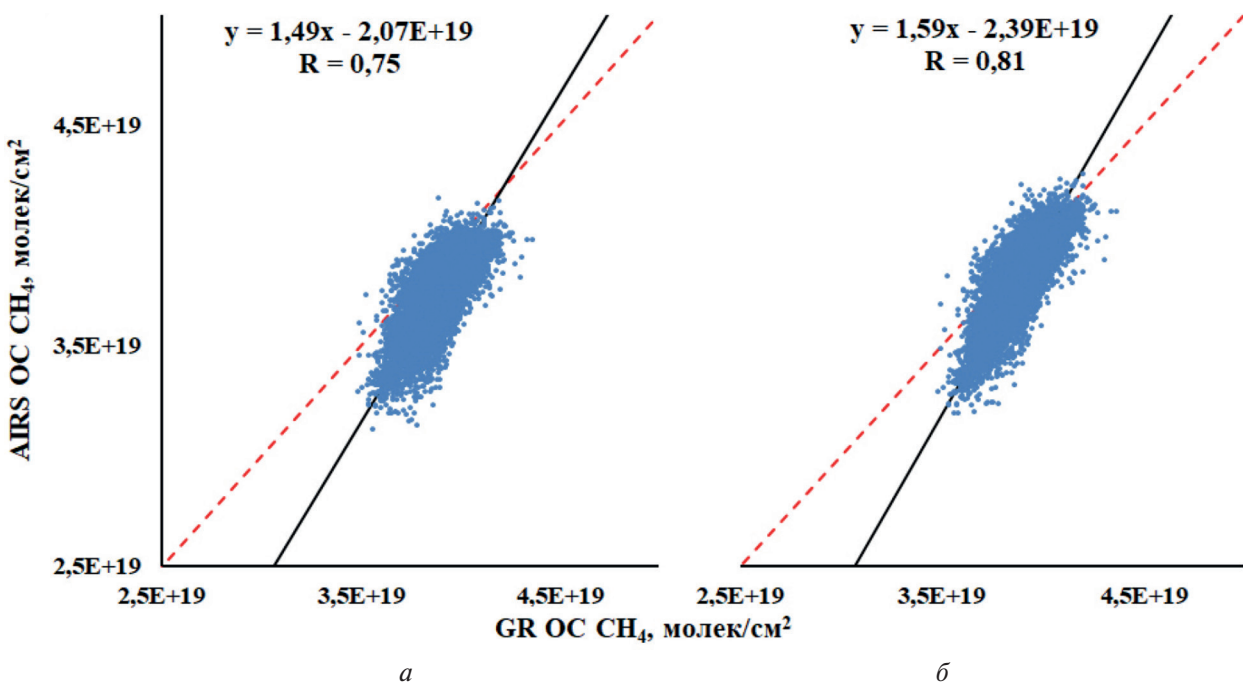


Рис. 5. Результаты сопоставления дневных данных AIRS v6 L3 с наземными измерениями CO_2 за 2003–2022 гг. для всех исследуемых станций NDACC за исключением Zugspitze, Jungfrauoch, Mauna Loa: а — исходные ряды; б — после применения коэффициента коррекции

Как упоминалось выше, нанесённые на одну корреляционную диаграмму измерения всех анализируемых станций не ложатся в единый массив (см. рис. 4а), а параметры корреляции в этом случае неудовлетворительны ($KH = 3,08$, $R = 0,45$). Применение универсального поправочного коэффициента на дрейф невязки также не помогло решить эту проблему полностью (после коррекции $KH = 2,98$, $R = 0,52$; см. рис. 4б). Однако для станций, расположенных (по данным AIRS) ниже 1000 м н. у. м. (см. рис. 5), использование корректирующей методики улучшило наблюдаемую общую картину корреляции (КК для этого массива вырос с 0,75 до 0,81), а также корреляцию во всех отдельно взятых пунктах (см. табл. 4).

В табл. 6 представлены рассчитанные по исходным и скорректированным рядам значения тренда ОС CH_4 .

Таблица 6. Оценка трендов ОС CH_4 (тренд $\pm 95\%$ -й доверительный интервал) для исследуемых станций NDAAC за период с 2003 по 2022 г. для исходных рядов AIRS – GR и с корректировкой дрейфа спутникового спектрометра AIRS

№	Пункт измерений	Исходный тренд, % в год			Тренд с учётом дрейфа, % в год	
		AIRS	GR	Δ , AIRS – GR	AIRS	Δ , AIRS – GR
1	Kiruna	0,27±0,02	0,39±0,02	-0,11	0,44±0,02	0,05
2	Harestua	0,25±0,05	0,46±0,05	-0,21	0,44±0,04	-0,02
3	St. Petersburg	0,28±0,03	0,48±0,03	-0,20	0,43±0,03	-0,05
4	Bremen	0,30±0,03	0,53±0,03	-0,23	0,46±0,03	-0,07
5	Zugspitze	0,29±0,03	0,42±0,02	-0,13	0,47±0,03	0,05
6	Jungfrauoch	0,33±0,04	0,42±0,02	-0,08	0,51±0,03	0,10
7	Toronto	0,24±0,02	0,37±0,03	-0,12	0,40±0,02	0,03
8	Izana	0,32±0,01	0,43±0,01	-0,11	0,48±0,01	0,04
9	Mauna Loa	0,30±0,05	0,46±0,02	-0,16	0,46±0,04	0,01
10	Reunion Maida	0,28±0,05	0,51±0,02	-0,22	0,44±0,05	-0,06
11	Wollongong	0,33±0,02	0,39±0,01	-0,06	0,49±0,02	0,10
12	Lauder	0,24±0,02	0,36±0,01	-0,11	0,41±0,02	0,06
	<i>Среднее</i>	0,29±0,03	0,43±0,02	–	0,45±0,03	–

При оценке трендов на основе исходных данных AIRS v6 для периода с 2003 по 2022 г. наблюдается систематическое занижение спутником величины тренда в среднем в ~1,5 раза относительно оценок по наземным измерениям станций NDACC. При применении динамической коррекции дрейфа невязки спутникового спектрометра с использованием универсального коэффициента результаты определения трендов на основе орбитальных и наземных рядов в каждом пункте практически совпали (с точностью до величины 95%-го доверительного интервала, см. табл. 6). Общее расхождение в оценках среднего тренда для всех станций ОС CH_4 после проведённой коррекции находится в пределах 5 % от тренда, что указывает на эффективность применения разработанной методики.

Заключение

Установлены значимые долговременные изменения параметров соответствия орбитальных данных ОС CH_4 AIRS Standard L3 v6 IR AIRS Only Daily наземным наблюдениям станций NDACC.

Тренд невязки (разности измерений орбитального спектрометра AIRS v6 L3 и наземных измерений станций сети NDACC) для ОС CH_4 за период с 2003 по 2022 г. для всех доступных парных значений отрицателен на всех исследуемых пунктах и определён как долговременный дрейф параметров спутникового прибора.

Средний коэффициент наклона линии тренда невязки для ОС CH_4 в натуральном выражении (SSD), рассчитанный на основании анализа данных 12 пунктов измерений, установлен как $17,2 \cdot 10^{13}$ молекул/см² в сутки.

Разработана и успешно применена методика динамической коррекции рядов орбитальных измерений ОС CH_4 с поправкой на универсальный коэффициент (суточный дрейф невязки).

После проведённой коррекции получено значимое улучшение параметров корреляции между скорректированными орбитальными и наземными данными. Кроме того, расхождение оценок трендов ОС CH_4 , полученных с использованием 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 — $0,45 \pm 0,03$ % в год; GR — $0,43 \pm 0,02$ % в год; против исходной оценки AIRS — $0,29 \pm 0,03$ % в год.

Разработанная методика является универсальной, т.е. применимой при валидационных исследованиях других долговременных орбитальных измерений.

Авторы благодарны коллективам NDACC и AIRS за возможность использования измерительных данных. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 20-17-00200.

Литература

1. Груздев А. Н., Елохов А. С. Сопоставление результатов многолетних измерений содержания NO_2 в стратосфере и тропосфере с помощью спутникового прибора OMI с результатами наземных измерений // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2023. Т. 59. № 1. С. 88–111. DOI: 10.31857/S0002351523010054.
2. Тимофеев Ю. М., Поляков А. В., Виралайнен Я. А. и др. Оценки трендов содержания климатически важных атмосферных газов вблизи Санкт-Петербурга // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 1. С. 97–103. DOI: 10.31857/S0002351520010113.
3. Хргиан А. Х. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеорол. изд-во, 1969. 644 с.
4. AIRS/AMSU/HSB. Version 6 Data Release User Guide / ed. Olsen E.T. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, 2017. https://docserver.gesdisc.eosdis.nasa.gov/repository/Mission/AIRS/3.3_ScienceDataProductDocumentation/3.3.4_ProductGenerationAlgorithms/V6_Data_Release_User_Guide.pdf.
5. 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. V. 41. No. 2. P. 253–264. DOI: 10.1109/TGRS.2002.808356.
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. V. 18. P. 4935–4964. DOI: 10.5194/acp-18-4935-2018.
7. Eldering A., O'Dell C. W., Wennberg P. O. et al. The Orbiting Carbon Observatory-2: First 18 months of science data products // Atmospheric Measurement Techniques. 2017. V. 10. No. 2. P. 549–563. DOI: 10.5194/amt-10-549-2017.
8. Flores E., Viallon J., Moussay P., Wielgosz R. I. Accurate Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopy measurements of nitrogen dioxide (NO_2) and nitric acid (HNO_3) calibrated with synthetic spectra // Applied Spectroscopy. 2013. V. 67. No. 10. P. 1171–1178. DOI: 10.1366/13-07030.
9. Hase F. Improved instrumental line shape monitoring for the ground-based, high-resolution FTIR spectrometers of the network for the detection of atmospheric composition change // Atmospheric Measurement Techniques. 2012. No. 5. P. 603–610. DOI: 10.5194/amt-5-603-2012.
10. Jiang Z., Worden J. R., Worden H. et al. A fifteen year record of CO emissions constrained by MOPITT CO observations // Atmospheric Chemistry and Physics. 2017. V. 17. P. 4565–4583. DOI: 10.5194/acp-17-4565-2017.
11. Krol M., Peters W., Hooghiemstra P. et al. How much CO was emitted by the 2010 fires around Moscow? // Atmospheric Chemistry and Physics. 2013. V. 13. P. 4737–4747. DOI: 10.5194/acp-13-4737-2013.
12. Orbiting Carbon Observatory 3. National Aeronautics and Space Administration, 2019. <https://d2pn8kiwq2w21t.cloudfront.net/documents/oco-3-fact-sheet-4-pages.pdf>.
13. Rakitin V. S., Shtabkin Yu. A., Elansky N. F. et al. Comparison results of satellite and ground-based spectroscopic measurements of CO, CH_4 , and CO_2 total contents // Atmospheric and Oceanic Optics. 2015. V. 28. No. 6. P. 533–542. DOI: 10.1134/S1024856015060135.

14. *Rakitin V. S., Skorokhod A. I., Pankratova N. V. et al.* Recent changes of atmospheric composition in background and urban Eurasian regions in XXI-th century // IOP Conf. Ser. Earth and Environmental Science. 2020. Iss. 606. Article 012048. DOI: 10.1088/1755-1315/606/1/012048.
15. *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. 29th Intern. Symp. Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 2023. V. 12780. Article 127805T. DOI: 10.1117/12.2690561.
16. *Reddy P. J., Taylor C.* Downward trend in methane detected in a northern Colorado oil and gas production region using AIRS satellite data // Earth and Space Science. 2022. V. 9. Iss. 12. Article e2022EA002609. DOI: 10.1029/2022EA002609.
17. *Rodionova N. V.* Correlation of ground-based and satellite measurements of methane concentration in the surface layer of the atmosphere in the Tiksi Region // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2022. V. 58. No. 12. P. 1610–1618. DOI: 10.1134/S0001433822120209.
18. *Wang P., Elansky N. F., Timofeev Yu. M. et al.* Long-term trends of carbon monoxide total columnar amount in urban areas and background regions: Ground- and satellite-based spectroscopic measurements // Advances in Atmospheric Sciences. 2018. V. 35. No. 7. P. 785–795. DOI: 10.1007/s00376-017-6327-8.
19. *Yurganov L., Rakitin V.* Two decades of satellite observations of carbon monoxide confirm the increase in northern hemispheric wildfires // Atmosphere. 2022. V. 13. Article 1479. DOI: 10.3390/atmos13091479.
20. *Yurganov L. N., McMillan W. W., Dzhola A. V. et al.* Global AIRS and MOPITT CO measurements: Validation, comparison, and links to biomass burning variations and carbon cycle // J. Geophysical Research. 2008. V. 113. Article D09301. DOI: 10.1029/2007JD009229.
21. *Yurganov L. N., Rakitin V., Dzhola A. et al.* Satellite- and ground-based CO total column observations over 2010 Russian fires: accuracy of top-down estimates based on thermal IR satellite data // Atmospheric Chemistry and Physics. 2011. V. 11. P. 7925–7942. DOI: 10.5194/acp-11-7925-2011.

Estimation of drift in the quality of orbital observations and application of correction methods to long-term series using the example of AIRS measurements of methane total content

V. S. Rakitin, E. I. Fedorova, N. S. Kirillova, N. V. Pankratova, N. F. Elansky

*A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow 119017, Russia
E-mail: fedorova@ifaran.ru*

The work is dedicated to the validation of the satellite product AIRS v6 (Atmospheric InfraRed Sounder, version 6, data type IR AIRS Only) on methane total content (TC) by observations from 12 ground-based spectrometers of the Network for the Detection of Atmospheric Composition Change (NDACC) for the period 2003–2022. The aim of the work was to develop a universal method of orbital data correction, to improve the consistency of orbital measurements with ground-based data, and to increase the accuracy of estimates of trends in atmospheric composition and parameters. It was found that for methane TC the differential linear trend between satellite and ground-based measurements is negative at all stations. The observed effect indicates the presence of a drift in the parameters of the satellite spectrometer. For methane TC, the average coefficient of linear trend difference ($1,72 \cdot 10^{14}$ molec/cm² per day) was calculated on the basis of the data sets of all statistically sufficiently supported stations and synchronized measurement series AIRS v6. A satellite data dynamic correction was then performed using the obtained average coefficient. The average daily methane TC correlation parameters and methane TC trend estimates based on observations from the AIRS orbital instrument and NDACC ground-based spectrometers were compared before and after correction. A significant improvement in the fit of both parameters was obtained using the developed methodology. The correlation coefficient for each site increased substantially. Before correction, trend estimates based on the initial synchronised series were systematically underestimated by the satellite (on average by ~1.5 times compared to estimates based on ground-based data). After applying the dynamic correction, the satellite trend values became significantly closer to the ground-based estimates at most measurement sites. After correction, the averaged methane TC trend for 2003–2022 for 12 sites according

to satellite measurements was $0,45 \pm 0,03 \text{ \%} \cdot \text{yr}^{-1}$, which is in good agreement with estimates based on ground-based observations ($0,43 \pm 0,02 \text{ \%} \cdot \text{yr}^{-1}$). The developed methodology is applicable to any long-term satellite observations.

Keywords: atmospheric composition, atmospheric remote sensing, validation, total content, methane, ground measurements, drift

Accepted: 07.10.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-33-47

References

1. Gruzdev A. N., Elohov A. S., Comparison of data of OMI long-term measurements of NO_2 contents in the stratosphere and troposphere with the results of ground-based measurements, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2023, Vol. 59, pp. 78–99, <https://doi.org/10.1134/S000143382301005X>.
2. Timofeev Yu. M., Polyakov A. V., Virolainen Ya. A. et al., Estimates of trends of climatically important atmospheric gases near St. Petersburg, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2020, Vol. 56, No. 1, pp. 79–84, DOI: 10.1134/S0001433820010119.
3. Hrgian A. H., *Fizika atmosfery* (Atmospheric physics), Leningrad: Hydrometeorological Izd., 1969, 644 p. (in Russian).
4. *AIRS/AMSU/HSB. Version 6 Data Release User Guide*, Olsen E. T. (ed.), Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, 2017, https://docserver.gesdisc.eosdis.nasa.gov/repository/Mission/AIRS/3.3_ScienceDataProductDocumentation/3.3.4_ProductGenerationAlgorithms/V6_Data_Release_User_Guide.pdf.
5. 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, Vol. 41, No. 2, pp. 253–264, DOI: 10.1109/TGRS.2002.808356.
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, Vol. 18, pp. 4935–4964, DOI: 10.5194/acp-18-4935-2018.
7. Eldering A., O'Dell C. W., Wennberg P. O. et al., The Orbiting Carbon Observatory-2: First 18 months of science data products, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2017, Vol. 10, pp. 549–563, DOI: 10.5194/amt-10-549-2017.
8. Flores E., Viallon J., Moussay P., Wielgosz R. I., Accurate Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopy measurements of nitrogen dioxide (NO_2) and nitric acid (HNO_3) calibrated with synthetic spectra, *Applied Spectroscopy*, 2013, Vol. 67, No. 10, pp. 1171–1178, DOI: 10.1366/13-07030.
9. Hase F., Improved instrumental line shape monitoring for the ground-based, high-resolution FTIR spectrometers of the network for the detection of atmospheric composition change, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2012, No. 5, pp. 603–610, DOI: 10.5194/amt-5-603-2012.
10. Jiang Z., Worden J. R., Worden H. et al., A fifteen year record of CO emissions constrained by MOPITT CO observations, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, Vol. 17, pp. 4565–4583, DOI: 10.5194/acp-17-4565-2017.
11. Krol M., Peters W., Hooghiemstra P. et al., How much CO was emitted by the 2010 fires around Moscow? *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, Vol. 13, pp. 4737–4747, DOI: 10.5194/acp-13-4737-2013.
12. *Orbiting Carbon Observatory 3*, National Aeronautics and Space Administration, 2019, <https://d2pn8kiwq2w21t.cloudfront.net/documents/oco-3-fact-sheet-4-pages.pdf>.
13. Rakitin V. S., Shtabkin Yu. A., Elansky N. F. et al., Comparison results of satellite and ground-based spectroscopic measurements of CO, CH_4 , and CO_2 total contents, *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2015, Vol. 28, No. 6, pp. 533–542, DOI: 10.1134/S1024856015060135.
14. Rakitin V. S., Skorokhod A. I., Pankratova N. V. et al., Recent changes of atmospheric composition in background and urban Eurasian regions in XXI century, *IOP Conf. Ser. Earth and Environmental Science*, 2020, Iss. 606, Article 012048, DOI: 10.1088/1755-1315/606/1/012048.
15. 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, 29th Intern. Symp. Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*, 2023, Vol. 12780, Article 127805T, DOI: 10.1117/12.2690561.
16. Reddy P. J., Taylor C., Downward trend in methane detected in a northern Colorado oil and gas production region using AIRS satellite data, *Earth and Space Science*, 2022, Vol. 9, Iss. 12, Article e2022EA002609, DOI: 10.1029/2022EA002609.

17. Rodionova N. V., Correlation of ground-based and satellite measurements of methane concentration in the surface layer of the atmosphere in the Tiksi Region, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2022, Vol. 58, No. 12, pp. 1610–1618, DOI: 10.1134/S0001433822120209.
18. Wang P., Elansky N. F., Timofeev Yu. M. et al., Long-term trends of carbon monoxide total columnar amount in urban areas and background regions: Ground- and satellite-based spectroscopic measurements, *Advances in Atmospheric Sciences*, 2018, Vol. 35, No. 7, pp. 785–795, DOI: 10.1007/s00376-017-6327-8.
19. Yurganov L., Rakitin V., Two decades of satellite observations of carbon monoxide confirm the increase in Northern Hemispheric Wildfires, *Atmosphere*, 2022, Vol. 13, Article 1479, DOI: 10.3390/atmos13091479.
20. Yurganov L. N., McMillan W. W., Dzhola A. V. et al., Global AIRS and MOPITT CO measurements: Validation, comparison, and links to biomass burning variations and carbon cycle, *J. Geophysical Research*, 2008, Vol. 113, Article D09301, DOI: 10.1029/2007JD009229.
21. Yurganov L. N., Rakitin V., Dzhola A. et al., Satellite- and ground-based CO total column observations over 2010 Russian fires: accuracy of top-down estimates based on thermal IR satellite data, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, Vol. 11, pp. 7925–7942, DOI: 10.5194/acp-11-7925-2011.