

## Результаты сопоставления спутниковых измерений общего содержания CO, CH<sub>4</sub> и CO<sub>2</sub> с наземными спектроскопическими данными

В.С. Ракитин, Ю.А. Штабкин, Н.Ф. Еланский, Н.В. Панкратова,  
А.И. Скороход, Е.И. Гречко, А.Н. Сафронов\*

*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН  
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3*

Поступила в редакцию 8.06.2015 г.

Собран, систематизирован и проанализирован значительный объем спутниковых и наземных данных об общем содержании в атмосфере CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> в 2010–2013 гг. Получены переходные соотношения между спутниковыми и наземными данными об общем содержании исследуемых примесей в разных измерительных пунктах (станции NDACC/GAW, а также станции ИФА РАН) с разным пространственным и временным разрешением. Для фоновых условий установлена высокая корреляция среднедневных спутниковых содержаний CO, продукты AIRS v6 ( $R^2 = 0,48–0,96$ ), IASI MetOp-A ( $R^2 = 0,25–0,86$ ) и MOPITT v6 Joint ( $R^2 = 0,30–0,83$ ), усреднение  $1^\circ \times 1^\circ$ , с наземными данными солнечных спектрометров. В случае высокого загрязнения слоя перемешивания отмечена значительная недооценка орбитальными сенсорами содержания CO (от 1,7 до 4,7 раза в зависимости от сенсора, пространственного разрешения и пункта наблюдений). Репрезентативные переходные соотношения и коэффициенты корреляции ( $R^2 \geq 0,5$ ) между среднедневными данными о CH<sub>4</sub> и наземными данными дифракционных спектрометров ИФА РАН и Фурье-спектрометров станций GAW получены только для сенсора AIRS. Наилучшая корреляция с наземными данными по CO<sub>2</sub> ( $R^2 = 0,25$  для среднедневных значений, усреднение  $1^\circ \times 1^\circ$ ) получена для сенсора IASI. Среднедневные значения общего содержания CH<sub>4</sub> сенсора IASI MetOp-A слабо коррелируют с наземными данными, а также с данными AIRS.

*Ключевые слова:* окись углерода, метан, углекислый газ, атмосферная спектроскопия, дистанционное зондирование, спутниковые методы, фоновые и загрязненные районы, пограничный слой атмосферы; carbon monoxide, methane, carbon dioxide, atmospheric spectroscopy, remote sensing, satellite sensing, background and polluted regions, atmospheric boundary layer.

### Введение

Для оценки изменений состава атмосферы и связанных с ними климатических измерений необходим огромный объем репрезентативных данных. К сожалению, на огромных пространствах Евразии число станций мониторинга состава атмосферы невелико, особенно в труднодоступных и малонаселенных районах Центральной Сибири, в Арктике и на Дальнем Востоке. Между тем в таких районах, как Западная, Центральная и Восточная Сибирь, эмиссии многих газов и аэрозолей от лесных пожаров в отдельные годы составляют до 90% от общего вклада природных пожаров на территории Евразии. В этой связи весьма интересным является использование спутниковых данных о составе атмосферы, в частности

о содержании климатически активных газов CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, об аэрозольной оптической толщине, о загрязняющих примесях (CO, NO<sub>2</sub>). Современные спутниковые сенсоры сканируют большую часть земной поверхности, в том числе практически всю территорию Евразии, 1–2 раза в сутки.

К сожалению, несмотря на это достоинство, спутниковые технологии мониторинга относительно новы и не лишены недостатков. Наиболее серьезные из них – влияние облачности и альбедо подстилающей поверхности на результаты измерений, а также низкая чувствительность орбитальных спектрометров к изменениям концентрации исследуемых примесей в нижней части тропосферы (слой 0–3 км). Этот недостаток особенно проявляется в условиях загрязнения, т.е. при интенсивных эмиссиях с земной поверхности (например, эмиссии от природных пожаров, антропогенные эмиссии крупных городов и промышленных районов) [1, 2].

Поэтому получение репрезентативных спутниковых данных о составе атмосферы и тщательная их валидация по наземным измерениям имеют очень важное значение для изучения и прогнозирования тенденций изменения состава атмосферы и климата.

\* Вадим Станиславович Ракитин (vadim@ifaran.ru); Юрий Александрович Штабкин (yuryshtabkin@gmail.com); Николай Филиппович Еланский (n.f.elansky@mail.ru); Наталья Владимировна Панкратова (n\_pankratova@list.ru); Андрей Иванович Скороход (askorokhod@mail.ru); Евгений Иванович Гречко (eigrechko@gmail.com); Александр Николаевич Сафронов (safronov\_2003@mail.ru).

В большинстве зарубежных и отечественных работ по валидации спутниковых и наземных данных практикуются следующие подходы.

1. Валидация и сопоставление проводятся для усредненных по 10–30-дневным периодам значений содержания или выбирается большое число станций, и средние отличия наземных и спутниковых данных оказываются невелики, в то время как в отдельных пунктах эти расхождения могут достигать 20–30% даже при 30-дневных усреднениях.

2. Для сопоставления используются приземные значения концентрации примеси, полученные с помощью восстановления вертикального профиля концентрации [2–6], либо для валидации выбираются заведомо фоновые станции, как в [5, 7].

3. Даже в случае использования среднедневных значений в работе нередко не приводятся коэффициенты корреляции и наклоны линии регрессии, т.е. параметры переходных соотношений [6, 8], необходимые для коррекции спутниковых данных.

4. Интересные результаты верификации вертикальных профилей CO, CH<sub>4</sub>, O<sub>3</sub> и CO<sub>2</sub> сенсора IASI с данными самолетных измерений приведены в нескольких публикациях, например в [9]. Однако, к сожалению, объем верификации в таких работах обычно ограничен несколькими измерительными днями, а условия измерений часто близки к фоновым. Тем не менее даже в фоновых условиях отмечено занижение сенсором IASI концентраций CO в слое перемешивания на 8–30% [9].

Иными словами, приведенных в современной научной литературе данных о валидации спутниковых измерений недостаточно для получения репрезентативной информации о содержании и вариациях многих газовых примесей (CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> и др.) в районах, в которых наземные измерения не проводятся.

Отсутствие этой информации приводит, например, к большим неопределенностям при получении оценок трендов и эмиссий. Поскольку многие оценки эмиссий от природных пожаров базируются на обратном моделировании с использованием спутниковых данных о содержании и концентрации атмосферных примесей, то нередко эти оценки являются заниженными, а в ряде эпизодов могут отличаться друг от друга в разы и даже на порядок величины [1, 2, 10, 11].

В связи с этим основными задачами настоящей работы являлись:

- предварительная валидация спутниковых данных о содержании CO, CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> с данными наземных спектрометров и станций ИФА РАН и WMO в фоновых условиях;
- выявление особенностей переходных соотношений для разных эмиссионных сценариев и сезонов;
- выбор наиболее репрезентативных наземных и спутниковых рядов и баз данных с целью последующего использования спутниковых данных при оценке изменений состава атмосферы и климатических изменений.

## 1. Выбор данных для сопоставления спутниковых и наземных измерений

### 1.1. Орбитальные спектрометры

Для сопоставления использовались позднейшие версии спутниковых продуктов: MOPITT v6 Joint, AIRS v6 (standard, только данные) и IASI.

MOPITT (Measurements Of Pollution In The Troposphere) запущен на орбиту Земли на борту спутника Terra в 1999 г. Предназначен для отслеживания изменений в структуре загрязнения и их влияния на нижние слои атмосферы. Записывает спектры инфракрасного излучения Земли в спектральных диапазонах около 4,7 мкм (канал TIR, TermalInfraRed) и 2,3 мкм (канал NIR, NearInfraRed) около 10:30 утра местного времени [12, 13]. Нами были использованы дневные данные об общем содержании (OC) CO третьего уровня Level 3 v6 Joint (разрешение 1° × 1°) и последующее их усреднение по другим доменам. Подробные описания продуктов MOPITT v5, v6 приведены соответственно в [7, 14, 15].

AIRS (Atmospheric InfraRed Sounder) запущен на борту спутника Aqua 4 мая 2002 г. Предназначен для измерения влажности, температуры, характеристик облачного покрова и содержания парниковых газов в атмосфере. Основной элемент – орбитальный дифракционный спектрометр – записывает спектры атмосферного поглощения инфракрасного излучения Земли в спектральном диапазоне от 3,75 до 15,4 мкм [16–18] дважды в сутки с покрытием более 80% земной поверхности. Данные первичных уровней рассчитываются для ячейек примерно 45 × 45 км. В настоящей статье использовались данные третьего уровня Level 3 v6 (разрешение 1° × 1°), только дневные измерения OC CO, CH<sub>4</sub> и CO<sub>2</sub> с восходящей орбиты (ascending, т.е. около 12:30–13:30 местного времени для каждого пункта), с последующим усреднением по другим доменам.

IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer) входит в состав орбитальных комплексов MetOp-A (запущен в 2006 г.) и MetOp-B (2012 г.) [19–21]. Предназначен для записи спектра собственного излучения Земли в диапазоне от 645 до 2760 см<sup>-1</sup> (15,5 и 3,63 мкм соответственно) с разрешением около 0,5 см<sup>-1</sup>. В первую очередь прибор используется для предоставления в реальном времени информации о температуре и содержании водяного пара в атмосфере практически над всей поверхностью Земли; из спектров также могут быть получены вертикальные профили концентраций некоторых газов, в том числе CO, CH<sub>4</sub> и CO<sub>2</sub>. Нами были использованы данные IASI MetOp-A второго уровня Level 2 (профили концентрации для ячеек примерно 18 × 22 км) с последующим усреднением по доменам разной протяженности и вычислением среднедневных значений OC в первую половину дня, т.е. во время наземных спектроскопических измерений.

Для сопоставления использовались спутниковые данные о содержании CO – сенсоров MOPITT,

AIRS, IASI, и о содержании  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  – данные сенсоров AIRS и IASI. Для всех сенсоров использовалось среднесуточное усреднение по доменам  $1^\circ \times 1^\circ$  и  $5^\circ \times 5^\circ$  с центром домена примерно над наземным пунктом наблюдений. При этом выбирались данные измерений, отстоящие от наземных по времени не более чем на 3 ч, или наземные данные усреднялись по периоду, совпадающему со временем пролета спутника с точностью 3 ч; для IASI использовались данные первой половины дня, для AIRS – только данные восходящей орбиты (ascending), для MOPITT – только дневные данные.

## 1.2. Наземные измерения

Использовались наземные данные о содержании CO однотипных солнечных дифракционных спектрометров среднего разрешения ( $0,2 \text{ см}^{-1}$ ) [1, 2, 22, 23] станций ИФА РАН ЗНС (Звенигород, Московская обл.) и ZOTTO (Центральная Сибирь), станции ИФА РАН в Пекине, а также данные ОС CO и  $\text{CH}_4$  солнечных Фурье-спектрометров, расположенных на станциях международной сети мониторинга NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change) и GAW (Global Atmospheric Watch): CO,  $\text{CH}_4$  – Кируна (Bruker 120HR, Швеция), Най Алезунд (Bruker 120, Норвегия) и Харестуа (Bruker 125M, Норвегия), Бремен (Bruker 125HR, Германия). Данные станции Бремен использовались также для валидации данных о содержании  $\text{CO}_2$ . Три станции из перечисленных находятся в континентальных районах с развитой городской или промышленной инфраструктурой (ЗНС, Бремен, Пекин), остальные – в фоновых районах западноевропейской части Арктики. Данные измерений ОС CO на станции ЗНС (53 км к западу от Москвы) можно условно считать фоновыми, поскольку влияние Москвы, как показано в [22–24], на этой станции невелико. Спектрометры станций ИФА (ЗНС, ZOTTO и Пекин) прошли предварительную интеркалибровку между собой и с Фурье-спектрометрами станций NDACC [25]. Кроме того, данные упомянутых спектрометров NDACC и спектрометра ЗНС ИФА неоднократно использовались для валидации спутниковых измерений и модельных расчетов [1, 2, 25, 26]. Координаты и особенности расположения наземных станций, а также количество дней измерений, использованных для сопоставления, приведены в табл. 1.

Для сопоставления со спутниковыми данными по  $\text{CO}_2$  дополнительно использовались данные измерений концентрации углекислого газа на высотной мачте станции ZOTTO (измерительная спектроскопическая система, состоящая из 6 заборников воздуха, расположенных на уровнях от 4 до 301 м над уровнем земли, и газоанализатора [27]).

Наземные данные о содержании использовались в виде среднесуточных значений, измерения на всех наземных станциях проводились в солнечные дни. Характер зависимости между наземными и спутниковыми данными ОС выбирался, как правило, линейный:

$$U_{gr} = KU_{stl} + A,$$

где  $U_{gr}$  и  $U_{stl}$  – соответственно наземное и спутниковое содержание примеси;  $A$  – величина, являющаяся константой для каждой пары измерений, молек./ $\text{см}^2$ .

## 2. Результаты сопоставления спутниковых и наземных данных

### 2.1. Сенсор IASI

По итогам предварительной валидации сенсора IASI удовлетворительные результаты на уровне среднесуточных значений получены только для ОС CO ( $R^2 = 0,23\text{--}0,74$ , усреднение  $1^\circ \times 1^\circ$ ) для разных пунктов и периодов (табл. 2). Среднесуточные значения ОС CO хорошо повторяют сезонные вариации этого газа, полученные на наземных станциях. Коэффициенты корреляции наземных данных о содержании CO с данными IASI при усреднении  $1^\circ \times 1^\circ$ , как правило, в районах повышенных эмиссий выше, чем для усреднения  $5^\circ \times 5^\circ$  (рис. 1). В фоновых условиях коэффициенты корреляции для доменов  $1^\circ \times 1^\circ$  и  $5^\circ \times 5^\circ$  примерно одинаковы. В период май–сентябрь по сравнению с периодом октябрь–апрель отмечается лучшая корреляция данных ОС CO во всех пунктах, особенно в промышленных районах (например, ЗНС, Пекин, Бремен). Результаты сопоставления данных IASI с наземными данными ОС CO приведены в табл. 2.

Для  $\text{CH}_4$  корреляция между наземными данными станций Кируна и Бремен и среднесуточными значениями ОС, измеренными IASI, практически отсутствует. Сезонные вариации общего содержания  $\text{CH}_4$  (максимум в начале зимы, минимум –

Таблица 1

Расположение наземных пунктов измерений и количество дней сопоставления для каждого сенсора и примеси (для среднесуточных величин ОС и усреднения  $1^\circ \times 1^\circ$ )

| Пункт, годы            | Координаты, с.ш./в.д./высота над ур. м., м | Количество дней        |                        |           |
|------------------------|--|------------------------|------------------------|-----------|
|                        |  | IASI CO/ $\text{CH}_4$ | AIRS CO/ $\text{CH}_4$ | MOPITT CO |
| ЗНС, 2010–2013         | 55,7°/36,8°/200                            | 228                    | 301                    | 64        |
| ZOTTO, 2010–2013       | 60,8°/89,4°/120                            | 44                     | 44                     | 10        |
| Бремен, 2011           | 53,1°/8,8°/30                              | 42/42                  | 39/39                  | –         |
| Кируна, 2010–2012      | 67,8°/20,4°/420                            | 110/196                | 105/192                | 18        |
| Харестуа, 2010, 2012   | 60,2°/10,8°/600                            | –                      | 94/97                  | 26        |
| Най Алезунд, 2010–2012 | 78,9°/11,9°/15                             | –                      | 85                     | 13        |
| Пекин, 2010–2013       | 39,97°/116,38°/200                         | –                      | 228                    | 52        |

Параметры соотношений между среднедневными значениями содержания CO, измеренными сенсором IASI, и данными наземных пунктов для усреднения по доменам 5° × 5° и 1° × 1°

| Пункт, годы                 | Лето    |         |         |         |                |         | Зима                             |         |         |         |                |         |
|-----------------------------|---------|---------|---------|---------|----------------|---------|----------------------------------|---------|---------|---------|----------------|---------|
|                             | K       |         | A       |         | R <sup>2</sup> |         | K                                |         | A       |         | R <sup>2</sup> |         |
|                             | 5° × 5° | 1° × 1° | 5° × 5° | 1° × 1° | 5° × 5°        | 1° × 1° | 5° × 5°                          | 1° × 1° | 5° × 5° | 1° × 1° | 5° × 5°        | 1° × 1° |
| ЗНС, 2010–2012, без пожаров | 1,47    | 1,17    | –0,8    | –0,3    | 0,63           | 0,43    | 0,88                             | 0,72    | 0,8     | 1,1     | 0,31           | 0,28    |
| Кируна, 2010–2012           | 1,37    | 1,20    | –0,8    | –0,5    | 0,88           | 0,86    | 1,23                             | 0,82    | –0,2    | 0,6     | 0,36           | 0,25    |
| ZOTTO, 2010–2013            | 4,66    | 3,51    | –6,5    | –4,4    | 0,68           | 0,70    | Только летние данные, с пожарами |         |         |         |                |         |
| Най Алезунд, 2011–2012      | 1,18    | 0,96    | –0,2    | 0,2     | 0,42           | 0,52    | Весь год                         |         |         |         |                |         |
| Бремен, 2011                | 1,36    | 0,87    | –0,4    | 0,6     | 0,53           | 0,36    | Весь год                         |         |         |         |                |         |

Примечание. Параметры K и A из (1). Размерность A равна · 10<sup>18</sup> молек./см<sup>2</sup>.

в начале лета) в высоких широтах Северного полушария данные IASI в основном отображают по всем выбранным фоновым пунктам, несмотря на низкую корреляцию среднедневных значений.

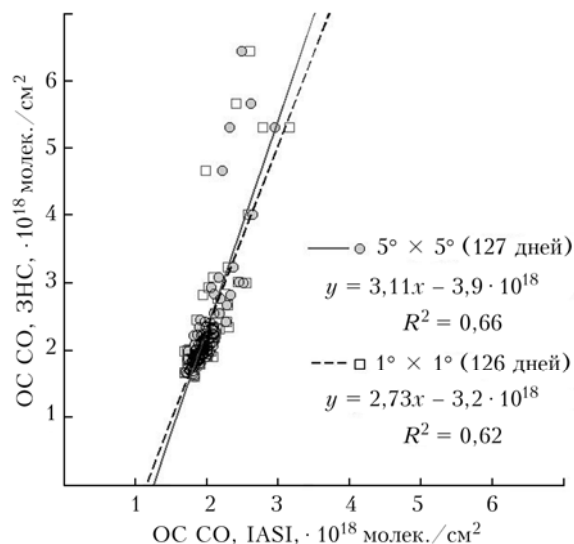


Рис. 1. Корреляция наземных измерений содержания CO, произведенных в пункте ЗНС, и спутниковых (IASI) данных (среднедневные значения) в летний период (май–сентябрь) 2010–2012 гг. Усреднение спутниковых данных IASI производилось по домену 5° × 5° (кружочки) и по домену 1° × 1° (квадратики). Исследовались незагрязненные условия с отдельными случаями переноса загрязнений. Высокие значения содержания соответствуют периоду природных пожаров 2010 г.

По CO<sub>2</sub> данные IASI отображают характер сезонных вариаций. Разница между измеренными среднесуточными наземными и спутниковыми содержаниями CO<sub>2</sub> не превышает 3%; при сопоставлении профилей CO<sub>2</sub> с данными измерительной вышки обсерватории ZOTTO получена слабая положительная корреляция (R<sup>2</sup> = 0,25) со средней в слое 300 м концентрацией (3-часовое усреднение, период совпадает со временем пролета спутника). Этот результат (т.е. невысокую корреляцию) можно объяснить суточными вариациями приземной

концентрации CO<sub>2</sub>, которые спутниковый спектрометр не может зафиксировать.

При сопоставлении данных о содержании CO<sub>2</sub> сенсора IASI и спектрометра станции Бремен (данные только за 2011 г.) получена слабовыраженная положительная корреляция (R<sup>2</sup> = 0,2 для среднедневных и R<sup>2</sup> = 0,3 для 10-дневных усреднений, домен 5° × 5°). На остальных выбранных станциях спектроскопические измерения ОС CO<sub>2</sub> в 2010–2013 гг. не проводились или данные отсутствуют.

Здесь следует отметить, что спутниковые продукты сенсора IASI по CH<sub>4</sub> и CO<sub>2</sub>, несмотря на доступность данных разных уровней и опубликованные многочисленные работы, в которых эти данные используются, находятся в стадии совершенствования и не позиционируются пока разработчиками как точные и надежные [19].

## 2.2. Сенсор AIRS

Данные ОС CO и CH<sub>4</sub> сенсора AIRS хорошо отображают характер сезонных вариаций для всех пунктов (табл. 3а, 3б).

Получена устойчивая положительная корреляция с наземными данными ОС CO всех пунктов, кроме загрязненного района Пекина (R<sup>2</sup> ~ 0,6–0,96), для среднедневных значений, что выше приведенных в [1] величин (табл. 3а, 4, 5 и рис. 2 и 3).

Коэффициенты корреляции при усреднении спутниковых данных по домену 1 × 1° так же, как и в случае с IASI, выше в условиях повышенных эмиссий и примерно одинаковы в фоновых условиях (см. табл. 3а и рис. 2 и 3). Особенности сопоставления спутниковых и наземных данных для условий загрязнения, в частности для Пекина, будут более подробно рассмотрены ниже.

Для AIRS, в отличие от IASI, получена выраженная положительная корреляция (R<sup>2</sup> ~ 0,3–0,6) между спутниковыми и наземными данными по CH<sub>4</sub> при сопоставлении среднесуточных величин (см. табл. 3б и рис. 4).

Спутниковые данные о содержании CH<sub>4</sub> AIRS и IASI на уровне среднедневных значений не коррелируют.

Таблица 3а

Корреляция средневзвешенных значений ОС СО, измеренных сенсором AIRS v6, с данными IASI и MOPITT v6 Joint (разрешение 1° × 1°, 2010–2012 гг. для IASI, 2010–2013 гг. для MOPITT, все сезоны)

| Пункт       | IASI |     |                | MOPITT |      |                | Годы      |
|-------------|------|-----|----------------|--------|------|----------------|-----------|
|             | K    | A   | R <sup>2</sup> | K      | A    | R <sup>2</sup> |           |
| ZOTTO       | 0,51 | 0,9 | 0,51           | 1,02   | 0,1  | 0,74           | 2010–2013 |
| Кируна      | 0,45 | 1,0 | 0,45           | 1,21   | -0,2 | 0,68           | 2010–2013 |
| Харестуа    | –    | –   | –              | 0,94   | 0,3  | 0,69           | 2010–2013 |
| Най Алезунд | 0,54 | 0,9 | 0,39           | 1,07   | -0,2 | 0,72           | 2010–2013 |
| ЗНС         | 0,47 | 0,9 | 0,38           | 1,34   | -0,4 | 0,64           | 2010–2013 |
| Бремен      | 0,44 | 1,0 | 0,40           | –      | –    | –              | 2011      |
| Пекин       | –    | –   | –              | 0,47   | 1,0  | 0,61           | 2010–2013 |

Примечание.  $U_N = KU_{AIRS} + A$ , где  $U_N$  – общее содержание СО, измеренное сенсорами IASI или MOPITT;  $U_{AIRS}$  – содержание СО, измеренное сенсором AIRS. Размерность  $A$  равна  $\cdot 10^{18}$  молек./см<sup>2</sup>.

Таблица 3б

Корреляция наземных (Кируна, Харестуа, Бремен, ЗНС) и спутниковых (AIRS, IASI) данных о содержании СН<sub>4</sub>, а также спутниковых данных между собой для средневзвешенных значений, усреднение 5° × 5°, период круглогодичный, 2010–2013 гг.

| Станция     | Наземные в сравнении с: |     |                |      |     |                | AIRS в сравнении с IASI |     |                |
|-------------|-------------------------|-----|----------------|------|-----|----------------|-------------------------|-----|----------------|
|             | AIRS                    |     |                | IASI |     |                | K                       | A   | R <sup>2</sup> |
|             | K                       | A   | R <sup>2</sup> | K    | A   | R <sup>2</sup> |                         |     |                |
| Харестуа    | 0,68                    | 1,0 | 0,40           | –    | –   | –              | –                       | –   | –              |
| Бремен      | 0,70                    | 1,1 | 0,21           | 0,06 | 3,5 | 0,03           | –                       | –   | –              |
| Кируна      | 0,82                    | 0,6 | 0,53           | 0,56 | 1,6 | 0,07           | 0,12                    | 3,3 | 0,07           |
| ЗНС         | –                       | –   | –              | –    | –   | –              | 0,12                    | 3,3 | 0,07           |
| Най Алезунд | –                       | –   | –              | –    | –   | –              | 0,27                    | 2,7 | 0,08           |

Примечание.  $U_{IASI} = KU_{AIRS} + A$ , где  $U_{IASI}$  и  $U_{AIRS}$  – содержание СН<sub>4</sub>, измеренное сенсорами IASI и AIRS соответственно. Размерность  $A$  равна  $\cdot 10^{19}$  молек./см<sup>2</sup>.

Таблица 4

Сезонные отличия переходных соотношений между спутниковыми и наземными средневзвешенными содержаниями СО (сенсоры IASI, AIRS, MOPITT) и СН<sub>4</sub> (AIRS) в условиях отсутствия сильных загрязнений, усреднение 1° × 1°. Периоды 1 мая – 30 сентября и 1 октября – 30 апреля

| Пункт, годы            | Лето        |           |                | Зима        |           |                | Спутниковый сенсор (примесь) |
|------------------------|-------------|-----------|----------------|-------------|-----------|----------------|------------------------------|
|                        | K           | A         | R <sup>2</sup> | K           | A         | R <sup>2</sup> |                              |
| ЗНС, 2010–2013         | 1,17        | 0,3       | 0,43           | 0,72        | 1,1       | 0,28           | IASI (СО)                    |
|                        | 0,86        | 0,4       | 0,48           | 1,06        | 0,1       | 0,66           | AIRS (СО)                    |
|                        | 0,40        | 1,0       | 0,30           | 0,70        | 0,8       | 0,40           | MOPITT (СО)                  |
| Кируна, 2010–2012      | 1,20        | -0,5      | 0,86           | 0,82        | 0,6       | 0,25           | IASI (СО)                    |
|                        | 1,02        | -0,05     | 0,96           | 1,00        | -0,1      | 0,47           | AIRS (СО)                    |
|                        | 1,10        | 0,3       | 0,83           | 0,72        | 0,06      | 0,52           | MOPITT (СО)                  |
| Харестуа, 2010, 2012   | <b>0,45</b> | <b>20</b> | <b>0,31</b>    | <b>0,78</b> | <b>8</b>  | <b>0,50</b>    | AIRS (СН <sub>4</sub> )      |
|                        | 0,95        | 0,08      | 0,75           | 0,95        | 0,04      | 0,79           | AIRS (СО)                    |
|                        | 0,44        | 0,4       | 0,31           | 0,83        | 0,5       | 0,81           | MOPITT (СО)                  |
| Най Алезунд, 2010–2012 | <b>0,59</b> | <b>13</b> | <b>0,35</b>    | <b>0,45</b> | <b>18</b> | <b>0,25</b>    | AIRS (СН <sub>4</sub> )      |
|                        | 1,05        | -0,2      | 0,77           | 1,08        | -0,2      | 0,74           | AIRS (СО)                    |
| ZOTTO, 2010–2013       | 0,69        | 0,6       | 0,65           | –           | –         | –              | MOPITT (СО)                  |
| Среднее                | 0,66        | 0,8       | 0,33           | –           | –         | –              | AIRS (СО)                    |
|                        | 1,18        | –         | –              | 0,77        | –         | –              | IASI (СО)                    |
|                        | 0,91        | –         | –              | 1,02        | –         | –              | AIRS (СО)                    |
|                        | 0,68        | –         | –              | 0,73        | –         | –              | MOPITT (СО)                  |
|                        | <b>0,52</b> | –         | –              | <b>0,62</b> | –         | –              | AIRS (СН <sub>4</sub> )      |

Примечание. Отсутствие данных в таблице по тому или иному сенсору, пункту или году означает недостаточную статистическую обеспеченность измерений. Случаи влияния природных пожаров исключены. Для IASI приводятся данные сопоставления только по СО для 2010–2012 гг. Параметры  $K$  и  $A$  из (1). Размерность  $A$  равна  $\cdot 10^{18}$  молек./см<sup>2</sup>.

Таблица 5

Отличия переходных соотношений между спутниковыми и наземными средневзвешенными содержаниями СО (сенсор AIRS) в фоновых и загрязненных условиях, усреднение 1° × 1°. Периоды 1 мая – 30 сентября и 1 октября – 30 апреля

| Пункт | Годы      | Небольшое загрязнение или фон/значительное загрязнение |                  |                   |             |             |                |
|-------|-----------|--|------------------|-------------------|-------------|-------------|----------------|
|       |           | Лето   |                  |                   | Зима        |             |                |
|       |           | K  | A                | R <sup>2</sup>    | K           | A           | R <sup>2</sup> |
| Пекин | 2010–2013 | 1,06   | 0,3              | 0,37              | <b>1,67</b> | <b>-0,9</b> | <b>0,36</b>    |
| ЗНС   | 2010–2013 | 0,86/ <b>2,48</b>                                      | 0,4/ <b>-2,4</b> | 0,48/ <b>0,77</b> | 1,06        | 0,2         | 0,61           |
| ZOTTO | 2010–2013 | 0,86/ <b>3,02</b>                                      | 0,8/ <b>-3,4</b> | 0,31/ <b>0,66</b> | –           | –           | –              |

Примечание. Для пунктов ЗНС и ZOTTO приведены параметры для летнего сезона. Летний период для Пекина можно считать относительно незагрязненным. Параметры  $K$  и  $A$  из (1). Размерность  $A$  равна  $\cdot 10^{18}$  молек./см<sup>2</sup>.

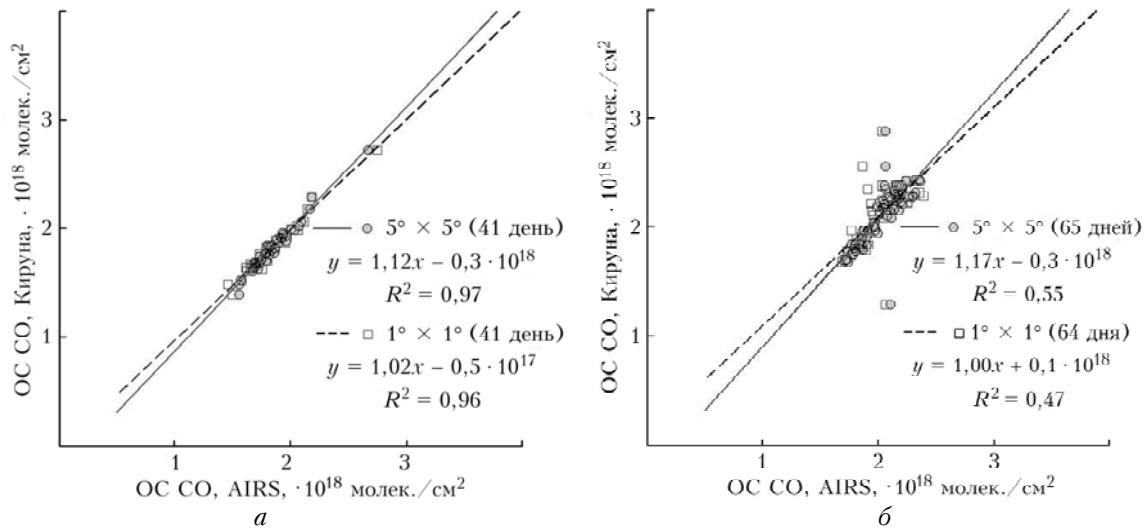


Рис. 2. Корреляция наземных и спутниковых (AIRS) данных о содержании CO (среднедневные значения, усреднение  $5^\circ \times 5^\circ$  и  $1^\circ \times 1^\circ$ ) в пункте Кируна, 2010–2012 гг., фоновые условия: *a* – май–сентябрь; *б* – октябрь–апрель

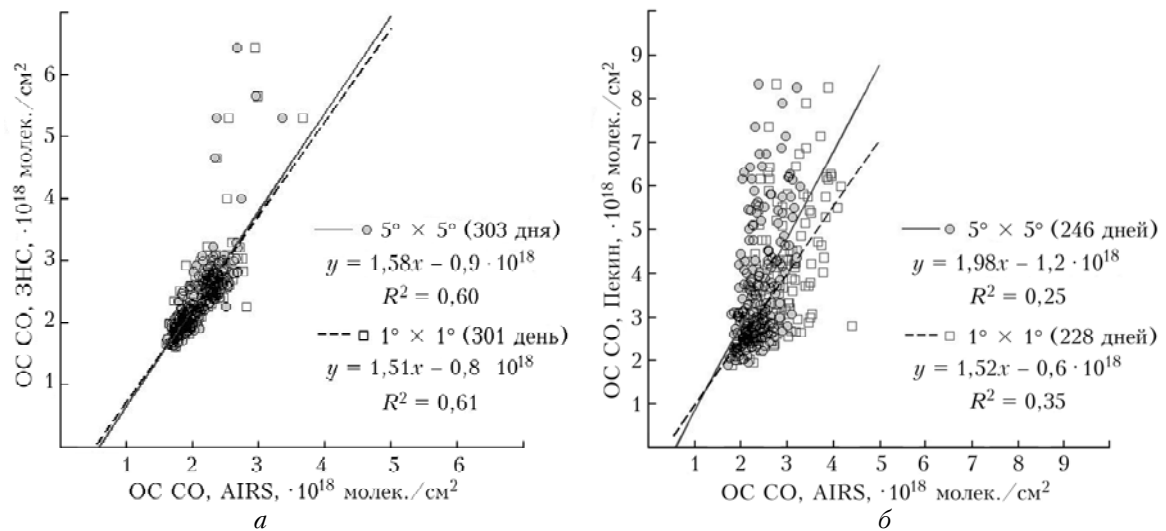


Рис. 3. Корреляция наземных и спутниковых (AIRS) данных о содержании CO (среднедневные значения): *a* – в пункте ЗНС в 2010–2013 гг. (фоновые условия); *б* – в Пекине, 2010–2013 гг. (загрязненные условия). Высокие значения содержания соответствуют периоду природных пожаров 2010 г.

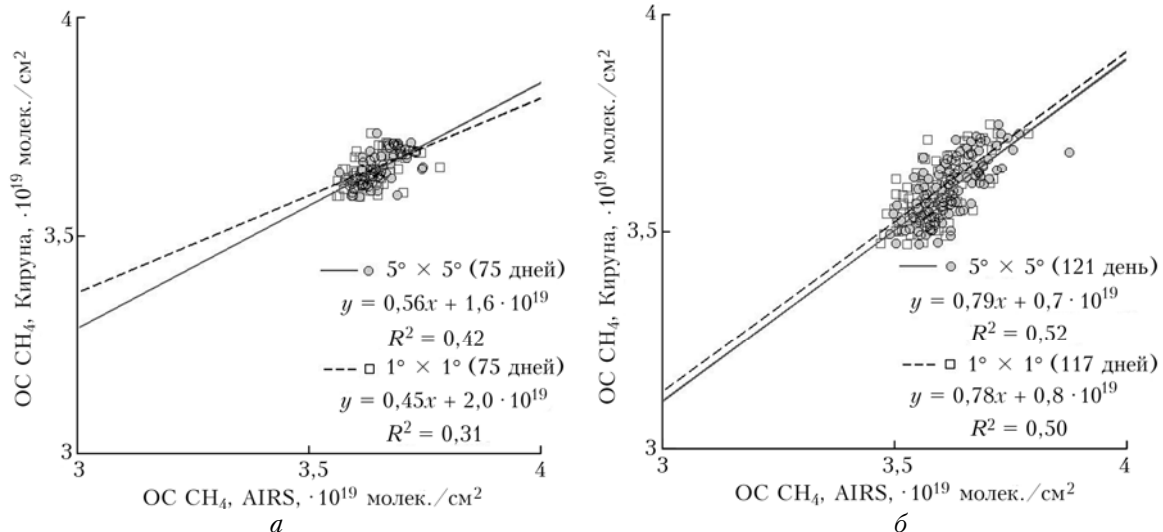


Рис. 4. Пример сопоставления спутниковых (AIRS) и наземных (пункт Кируна) среднедневных величин содержания  $\text{CH}_4$ , 2010–2013 гг., фоновые условия: *a* – май–сентябрь; *б* – октябрь–апрель

При сопоставлении данных о содержании CO<sub>2</sub> сенсора AIRS и спектрометра станции Бремен (данные только за 2011 г.) получена слабовыраженная положительная корреляция ( $R^2 = 0,1$  для среднедневных и  $R^2 = 0,3$  для 10-дневных усреднений, домен  $2^\circ \times 2,5^\circ$ ).

### 2.3. Сравнение данных IASI и AIRS

При сопоставлении среднедневных величин содержания CO получена положительная корреляция между спутниковыми данными (усреднение  $1^\circ \times 1^\circ$ ) обоих сенсоров,  $R^2 = 0,25-0,6$  в зависимости от пункта (см. табл. 3а).

По CH<sub>4</sub> корреляция между сенсорами практически отсутствует (см. табл. 3б). По CO<sub>2</sub> корреляция выражена слабо ( $R^2 < 0,1$  на уровне среднедневных значений и  $R^2 = 0,24$  при 10-дневном усреднении). Оба сенсора отображают характер сезонных вариаций CO<sub>2</sub>.

### 2.4. Сенсор MORITT v5, v6

В последних версиях спутникового продукта MORITT о содержании CO (v5 и v6) для записи спектров поглощения используются два спектральных канала – TIR, NIR, и комбинация этих каналов TIR/NIR (Joint по классификации разработчиков). Эти каналы, согласно [7], повышают чувствительность сенсора в нижней тропосфере. Коэффициенты корреляции, полученные при валидации, очень высоки для всех трех каналов ( $R^2 \sim 0,9$ ), но при этом в качестве реперных были использованы результаты наземных измерений преимущественно фоновых станций [7]. Не ставя под сомнение полученные авторами [7] результаты, отметим, что при сопоставлении среднедневных значений ОС СО продукта MORITT v6 Joint с наземными данными в условиях фоновых, средних и высоких загрязнений (станции ЗНС, ZOTTO во время летних природных пожаров, фоновые станции Кируна и Най Алезунд) нами получены  $R^2 = 0,30-0,83$  при усреднении  $1^\circ \times 1^\circ$ .

Все наземные данные станций ЗНС и ZOTTO с высокими значениями содержания СО относятся к летнему периоду, т.е. получены в условиях максимальной высоты слоя перемешивания (2–3 км), когда загрязнение конвективными процессами выносится от поверхности в более высокий слой, где спутниковый сенсор обладает лучшей чувствительностью. Коэффициенты корреляции среднедневных значений ОС СО MORITT v6 NIR (по сравнению с каналом Joint) с наземными данными оказались несколько ниже и для фоновых, и для загрязненных условий при всех примененных пространственных усреднениях. Поэтому здесь и далее мы приводим данные сопоставления только канала Joint.

При сопоставлении среднедневных значений MORITT v6 Joint с данными наземных измерений в загрязненном регионе Пекина получены, как правило, невысокие коэффициенты корреляции ( $R^2 = 0,25-0,52$ ) для усреднения  $1^\circ \times 1^\circ$  в зависимости от сезона. Переходные коэффициенты для усреднения  $1^\circ \times 1^\circ$   $K$  равны 0,4 и 0,96 для зимы и лета соответственно. Отметим, что зимний период

в Пекине характеризуется минимальной высотой слоя перемешивания и одновременно наиболее часто повторяющимися высокими уровнями загрязнения атмосферы [17–19]. Невысокие коэффициенты корреляции получены также при сопоставлении среднедневных значений ОС СО MORITT v6 Joint с данными AIRS v6 ( $R^2 = 0,13-0,61$  для этого же района для доменов  $5^\circ \times 5^\circ$  и  $1^\circ \times 1^\circ$  соответственно и периода 2010–2013 гг.) (см. табл. 3а). Несмотря на полученные для Пекина значения  $K \leq 1$  (см. табл. 3а), отметим, что максимальные среднедневные значения ОС СО продукта MORITT v6 Joint (усреднение  $1^\circ \times 1^\circ$ ) в районе столицы Китая не превышали  $5,2 \times 10^{18}$  молек./см<sup>2</sup>, период 2010–2014 гг. (измеренные в этот же период с земли значения ОС неоднократно превышали  $7,0 \cdot 10^{18}$  молек./см<sup>2</sup>). В то же время для Пекина, зимнего периода и выбранного домена  $K = 0,40$ , т.е. спутниковый продукт MORITT v6 Joint в данном случае в среднем существенно превышает значения ОС СО, «пропуская» отдельные высокие и низкие значения, и фиксирует высокие содержания, не подтверждаемые наземными измерениями.

При сопоставлении MORITT v5 Joint с наземными данными переходные соотношения оказались близки к полученным для v6, однако, коэффициенты корреляции для версии v5 оказались несколько выше по сравнению с v6 для большинства пунктов и пространственных усреднений.

### 2.5. О сезонных отличиях сопоставления

Как правило, все три сенсора (рассматриваются только случаи, когда установлена достаточная корреляция между наземными и спутниковыми измерениями СО и CH<sub>4</sub>) точнее повторяют наземные данные в летний период (с 1 мая по 30 сентября) (см. табл. 4). В большей степени это относится к СО, атмосферный перенос которого из промышленных районов приводит к отдельным случаям повышения содержания даже в фоновых пунктах. Отличия наблюдаются как в коэффициентах корреляции, так и в коэффициентах наклона линии регрессии (см. табл. 4). Мы объясняем этот факт большей высотой слоя перемешивания в летний период, и, соответственно, конвективным выносом примесей в более высокие слои тропосферы, в которых спутниковые сенсоры обладают лучшей чувствительностью.

### 2.6. О валидации данных общего содержания СО в условиях загрязнения

Повышенный уровень атмосферных загрязнений в 2010–2013 гг. наблюдался на наземных станциях ЗНС (природные пожары летом 2010 г.), ZOTTO (природные пожары летом 2011 и 2012 гг.) и в Пекине (систематически). Количество измерительных дней в этих условиях на ЗНС и в ZOTTO невелико (18 и 23 соответственно). Для Пекина был выбран весь массив данных 2010–2013 гг., 247 измерительных дней, 49 из которых приходятся на период 1 мая – 30 сентября.

Если коэффициенты корреляции между спутниковыми и наземными среднедневными значениями

ми ОС СО в условиях невысоких загрязнений (станции ЗНС и ZOTTO в отсутствие пожаров, Харестуа, Най Алезунд и Кируна) достаточно высоки ( $R^2 = 0,28-0,81$  для зимних условий и  $R^2 = 0,30-0,96$  для лета, усреднение  $1^\circ \times 1^\circ$ ), а наклон линии регрессии  $K$  в большинстве случаев (за исключением MOPITT v6 Joint) близок к 1 ( $K \sim 1$ ), то во время природных пожаров в Центральной европейской части России и Сибири (пункты ЗНС и ZOTTO) и для Пекина в зимний период переходное соотношение совсем другое: при достаточно высокой корреляции ( $R^2 = 0,36-0,8$ ) коэффициент наклона  $K = 1,67-4,66$  (см. табл. 5 и табл. 2). В то же самое время для летних эпизодов высоких загрязнений (природные пожары, пункты ЗНС и ZOTTO), т.е. при большой высоте слоя перемешивания,  $K = 2,19$  и  $2,89$  при  $R^2 = 0,54$  и  $0,79$  соответственно, усреднение  $1 \times 1^\circ$ . Следует отметить, правда, что приведенные здесь параметры сопоставления ОС СО MOPITT для пунктов ЗНС и ZOTTO (во время пожаров) статистически недостаточно обеспечены.

Наше предложение состоит в том, что при сопоставлении спутниковых и наземных данных в загрязненных условиях необходимо учитывать параметры слоя перемешивания во время измерений, например конвективный вынос или высоту атмосферного пограничного слоя. В частности, исключение из сопоставления дней с высотой слоя перемешивания в 11 ч UTM меньше 700 м для AIRS v6 и 800 м для MOPITT v6 Joint данных ОС СО для Пекина привело к существенному увеличению коэффициента корреляции для сенсоров AIRS и MOPITT, до  $R^2 = 0,49$  для AIRS (вместо 0,35) и  $R^2 = 0,66$  для MOPITT (вместо 0,35), усреднение  $1 \times 1^\circ$ , все сезоны 2010–2013 гг.

### Заключение

Установлена значимая корреляция (в зависимости от пункта, сезона и пространственного усреднения,  $R^2 = 0,28-0,96$ ) спутниковых и наземных данных ОС СО для всех спутниковых сенсоров и всех наземных пунктов в незагрязненных условиях, получены частные и общие параметры переходных соотношений для спутниковых продуктов IASI MetOp-A, AIRS v6 и MOPITT v6 Joint.

Лучшая корреляция спутниковых и наземных рядов ОС СО в летний период в большинстве пунктов объясняется более интенсивным конвективным перемешиванием и, соответственно, большей высотой АПС, что приводит к подъему примеси в среднюю тропосферу, т.е. на высоту удовлетворительной чувствительности спутниковых спектрометров.

В загрязненных условиях спутниковые продукты IASI и AIRS v6 занижают ОС СО от 1,7 до 4,7 раза. Дневные данные MOPITT v6 Joint в зимний период в условиях высокого загрязнения атмосферы Пекина плохо коррелируют с наземными значениями ОС СО. Для лучшей репрезентативности спутниковых данных о загрязнении в нижней тропосфере необходимы валидация и уточнение переходных соотношений с учетом параметров слоя перемешивания.

Наиболее репрезентативные результаты валидации по среднедневным значениям ОС метана получены для сенсора AIRS. Ряд данных ОС  $\text{CH}_4$  сенсора IASI недостаточно отображает характер сезонных вариаций ОС метана. Среднесуточные значения содержания  $\text{CH}_4$  сенсора IASI не коррелируют с наземными данными, а также с данными сенсора AIRS в большинстве пунктов.

С учетом больших неопределенностей спутниковых данных о составе атмосферы необходимо не только совершенствовать спутниковую измерительную аппаратуру и алгоритмы расчета, но и развивать наземную сеть мониторинга состава атмосферы, оснащенную в том числе высокоточными спектрометрами для измерения общего содержания и вертикальных профилей малых газовых составляющих.

Авторы выражают благодарность Л. Юрганову и С. Ситнову за помощь в интерпретации спутниковых данных и полезное обсуждение.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проекты № 13-05-41395, 14-05-91160, 13-05-12082, 14-05-31071 и РНФ, проект № 14-47-00049.

1. Yurganov L.N., Rakitin V., Dzhola A., August T., Fokeeva E., George M., Gorchakov G., Grechko E., Hannon S., Karpov A., Ott L., Semutnikova E., Shumsky R., Strow L. Satellite- and ground-based CO total column observations over 2010 Russian fires: accuracy of top-down estimates based on thermal IR satellite data // Atmos. Chem. Phys. 2011. V. 11. P. 7925–7942. DOI: 10.5194/acp-11-7925-2011.
2. Фокеева Е.В., Сафронов А.Н., Ракитин В.С., Юрганов Л.Н., Гречко Е.И., Шумский Р.А. Исследование влияния пожаров в июле–августе 2010 года на загрязнение окисью углерода атмосферы Москвы и окрестностей, оценка эмиссий // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2011. Т. 47, № 6. С. 1–18.
3. Garsia O., Schneider M., Hase F., Blumenstok T., Wiegeler A., Sepulveda E., Gomezpelaez A. Validation of the IASI operational  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  products using ground-based Fourier Transform Spectrometer: preliminary results at the Izaca Observatory (28°N, 17°W) // Annals of Geophys. 2013. DOI: 10.4401/ag-6326.
4. Parker R., Boesch H., Cogan A., Fraser A., Feng L., Palmer P.I., Messerschmidt J., Deutscher N., Griffith D.W.T., Notholt J., Wennberg P.O. Methane observations from the Greenhouse Gases Observing SATellite: Comparison to ground-based TCCON data and model calculations // Geophys. Res. Lett. 2011. V. 38, iss. 15. DOI: 10.1029/2011GL047871.
5. Clerbaux C., Boynard A., Clarisse L., George M., Hadji-Lazaro J., Herbin H., Hurtmans D., Pommier M., Razavi A., Turquety S., Wespes C., Coheur P.-F. Monitoring of atmospheric composition using the thermal infrared IASI/MetOp sounder // Atmos. Chem. Phys. 2009. V. 9. P. 6041–6054. DOI: 10.5194/acp-9-6041-2009.
6. Product Validation and Intercomparison Report (PVIR) for the Essential Climate Variable (ECV) Greenhouse Gases (GHG): Report of ESA Climate Change Initiative (CCI). 2013. URL: www.esa-ghg-cci.org/index.php?q=webfm\_send/152
7. Deeter M.N., Martinez-Alonso S., Edwards D.P., Emmons L.K., Gille J.C., Worden H.M., Pittman J.V., Daube B.C., Wofsy S.C. Validation of MOPITT Version 5 thermal-infrared, near-infrared, and multispectral carbon monoxide profile retrievals for 2000–2011 // J. Geophys. Res. A. 2013. V. 118. P. 6710–6725. DOI: 10.1002/jgrd.50272.



8. *Sussmann R., Stremme W., Buchwitz M., de Beek R.* Validation of ENVISAT/SCIAMACHY columnar methane by solar FTIR spectrometry at the Ground-Truthing Station Zugspitze // *Atmos. Chem. Phys.* 2005. V. 5. P. 2419–2429.
9. *Аршинов М.Ю., Афонин С.В., Белан Б.Д., Белов В.В., Гриднев Ю.В., Давыдов Д.К., Machida T., Nedelec Ph., Paris J.-D., Фофанов А.В.* Сравнение спутниковых и самолетных измерений газового состава в тропосфере над югом Западной Сибири // *Оптика атмосф. и океана.* 2013. Т. 26, № 9. С. 773–782.
10. *Сафронов А.Н., Фокеева Е.В., Ракитин В.С., Юрганов Л.Н., Гречко Е.И.* Эмиссии окиси углерода летом 2010 г. в центральной части среднеурусской равнины и оценка их неопределенности при использовании различных карт растительности // *Исслед. Земли из космоса.* 2012. № 4. С. 1–16.
11. *Ситнов С.А., Горчаков Г.И., Свириденков М.А., Горчакова И.А., Карпов А.В., Колесникова А.Б.* Аэрокосмический мониторинг дымового аэрозоля на европейской части России в период массовых пожаров лесов и торфяников в июле–августе 2010 г. // *Оптика атмосф. и океана.* 2012. № 12. С. 1062–1076.
12. *Deeter M.N., Emmons L.K., Francis G.L., Edwards D.P., Gille J.C., Warner J.X., Khattatov B., Ziskin D., Lamarque J.-F., Ho S.-P., Yudin V., Attié J.-L., Packman D., Chen J., Mao D., Drummond James R.* Operational carbon monoxide retrieval algorithm and selected results for the MOPITT instrument // *J. Geophys. Res.* D. 2003. V. 108, N 14. 4399. DOI: 10.1029/2002JD003186.
13. *Drummond J.R., Zou J., Nichituu F., Kar J., Deschambaut R., Hackett J.* A review of 9-year performance and operation of the MOPITT instrument // *J. Adv. Space Res.* 2010. V. 45. P. 760–774. DOI: 10.1016/j.asr.2009.11.019.
14. *Deeter M.N., Martínez-Alonso S., Edwards D.P., Emmons L.K., Gille J.C., Worden H.M., Sweeney C., Pittman J.V., Daube B.C., Wofsy S.C.* The MOPITT Version 6 product: algorithm enhancements and validation // *Atmos. Meas. Tech.* 2014. V. 7. P. 3623–3632. DOI: 10.5194/amt-7-3623-2014.
15. *Worden H.M., Deeter M.N., Edwards D.P., Gille J.C., Drummond J.R., Nédélec P.* Observations of near-surface carbon monoxide from space using MOPITT multispectral retrievals // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. D18314. DOI: 10.1029/2010JD014242.
16. *Aumann H.H., Chahine M.T., Gautier C., Goldberg M., Kalnay E., McMillin L., Revercomb H., Rosenkranz P.W., Smith W.L., Staelin D., Strow L., Susskind J.* AIRS/AMSU/HSB on the Aqua Mission: Design, Science Objectives, Data Products and Processing Systems // *IEEE Trans. Geosci. Remote. Sens.* 2003. V. 41. P. 253–264.
17. *McMillan W.W., Evans K.D., Barnet C.D., Maddy E.S., Sachse G.W., Diskin G.S.* AIRS V5 CO Retrieval With DACOM *In Situ* Measurements // *IEEE Trans. Geosci. Remote. Sens.* 2011. V. 49. P. 1–12. DOI: 10.1109/TGRS.2011.2106505.
18. *AIRS/AMSU/HSB Version 6 Level 2 Product User Guide* / Ed. by Edward T. Olsen. URL: [http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/AIRS/documentation/v6\\_docs/v6releasedocs-1/V6\\_L2\\_Product\\_User\\_Guide.pdf](http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/AIRS/documentation/v6_docs/v6releasedocs-1/V6_L2_Product_User_Guide.pdf)
19. *August T., Klaes D., Schlüssel P., Hultberg T., Crepeau M., Arriaga A., O'Carroll A., Coppens D., Munro R., Calbet X.* IASI on Metop-A: Operational Level 2 retrievals after five years in orbit // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2012. V. 113. P. 1340–1371.
20. *Clerbaux C., Turquety S., Coheur P.F.* Infrared remote sensing of atmospheric composition and air quality: Towards operational applications // *C. R. Geosci.* 2010. V. 342. P. 349–356. DOI: 10.1016/j.crte.2009.09.010.
21. *Clerbaux C., Boynard A., Clarisse L., George M., Hadji-Lazaro J., Herbin H., Hurtmans D., Pommier M., Razavi A., Turquety S., Wespes C., Coheur P.-F.* Monitoring of atmospheric composition using the thermal infrared IASI/MetOp sounder // *Atmos. Chem. Phys.* 2009. V. 9. P. 6041–6054. DOI: 10.5194/acp-9-6041-2009.
22. *Голицын Г.С., Гречко Е.И., Ван Г.Ч., Ван П.С., Джола А.В., Емиленко А.С., Копейкин В.М., Ракитин В.С., Сафронов А.Н., Фокеева Е.В.* Исследование загрязнения Москвы и Пекина окисью углерода и аэрозолями // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана.* 2015. Т. 51, № 1. С. 8–19.
23. *Ракитин В.С., Фокеева Е.В., Гречко Е.И., Джола А.В., Кузнецов Р.Д.* Вариации содержания окиси углерода в атмосфере Московского мегаполиса // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана.* 2011. Т. 47, № 1. С. 64–72.
24. *Pu-Cai W., Golitsyn G.S., Geng-Chen W., Grechko E.I., Rakitin V.S., Fokeeva M., Dzhola A.V.* Variation Trend and Characteristics of Anthropogenic CO Column Content in the Atmosphere over Beijing and Moscow // *Atmosph. Ocean. Sci. Lett. J.* 2014. V. 7, N 3. P. 243–247.
25. *Yurganov L., McMillan W., Grechko E., Dzhola A.* Analysis of global and regional CO burdens measured from space between 2000 and 2009 and validated by ground-based solar tracking spectrometers // *Atmos. Chem. Phys.* 2010. V. 10. P. 3479–3494.
26. *Safronov A.N., Fokeeva E.V., Rakitin V.S., Grechko E.I., Shumsky R.A.* Severe Wildfires Near Moscow, Russia in 2010: Modeling of Carbon Monoxide Pollution and Comparisons with Observations // *Remote Sens.* 2015. V. 7(1). P. 395–429. DOI: 10.3390/rs70100395.
27. *Winderlich J., Gerbig C., Kolle O., Heimann M.* Inferences from CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> concentration profiles at the Zotino Tall Tower Observatory (ZOTTO) on regional summertime ecosystem fluxes // *Biogeosci.* 2014. V. 11. P. 2055–2068. DOI: 10.5194/bg-11-2055-2014.

*V.S. Rakitin, Yu.A. Shtabkin, N.F. Elansky, N.V. Pankratova, A.I. Skorokhod, E.I. Grechko, A.N. Safronov.*  
**Results of comparison of satellite and ground-based spectroscopic CO, CH<sub>4</sub>, and CO<sub>2</sub> columns measurements.**

A significant amount of satellite and ground data of the CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> total content in the atmosphere in 2010–2013 was collected, organized and analyzed. Transition relations between satellite and ground-based data on the content of impurities investigated in different measuring points (stations NDACC/ GAW, as well as the OIAP RAS stations) with different spatial and temporal resolutions has been obtained. High correlation of diurnal satellite CO contents, products of AIRS v6 ( $R^2 = 0.48–0.96$ ), IASI MetOp-A ( $R^2 = 0.25–0.86$ ) and MOPITT v6 Joint ( $R^2 = 0.30–0.83$ ), averaging  $1 \times 1^\circ$ , with the ground data of solar spectrometers was established for background conditions. In the case of high pollution of the mixing layer, a significant underestimation of CO total content (from 1.7 to 4.7 times, depending on the sensor, and the spatial point of observation) was seen. Representative transition relations and correlation coefficients ( $R^2 \geq 0.5$ ) between the average daily data on CH<sub>4</sub> and ground data diffraction spectrometers IAP RAS and Fourier spectrometers of GAW stations were obtained only for sensor AIRS. The best correlation with ground data on CO<sub>2</sub> ( $R^2 = 0.25$  for diurnal values, averaging  $1 \times 1^\circ$ ) was obtained for the sensor IASI. Diurnal CH<sub>4</sub> total contents of sensor IASI MetOp-A poorly correlated with ground-based data as well as AIRS data.