

## Исследование трендов общего содержания CO и CH<sub>4</sub> над Евразией на основе анализа наземных и орбитальных спектроскопических измерений

В.С. Ракитин<sup>1</sup>, Н.Ф. Еланский<sup>1</sup>, Н.В. Панкратова<sup>1</sup>, А.И. Скороход<sup>1</sup>,  
А.В. Джола<sup>1</sup>, Ю.А. Штабкин<sup>1</sup>, П. Ван<sup>2</sup>, Г. Ван<sup>2</sup>, А.В. Васильева<sup>1</sup>,  
М.В. Макарова<sup>3</sup>, Е.И. Гречко<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН  
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3, Россия

<sup>2</sup>Институт физики атмосферы Китайской Академии наук  
100029, г. Пекин, № 40 Хуа Ян Ли, Ки Джиа Хуо Зи, район Чао Ян, п.я. 9804,  
Китайская Народная Республика

<sup>3</sup>Санкт-Петербургский государственный университет  
198504, г. Петергоф, ул. Ульяновская, 1, Россия

Поступила в редакцию 3.02.2017 г.

Для домена «Евразия» по данным спутникового спектрометра AIRS получены оценки трендов общего содержания (ОС) CO и CH<sub>4</sub> (0–180° в.д., 0–85° с.ш.) для разных временных периодов и сезонов. Результаты сопоставлены с аналогичными оценками, полученными на основе наземных спектроскопических измерений на 7 европейских станциях NDACC, в измерительных пунктах ИФА РАН (ЗНС, ZOTTO, Пекин) и СПбГУ (Петергоф), расположенных в исследуемом домене. ОС CO над Северной Евразией в период 2003–2015 гг. в целом убывало со скоростью 0,05–1,50%/год в зависимости от региона, а ОС CH<sub>4</sub> возрастало со скоростью 0,16–0,65%/год. С 2007 г. наблюдаются рост ОС CO в летние и осенние месяцы в большинстве средне- и высокоширотных фоновых районов Евразии, а также увеличение скорости роста ОС CH<sub>4</sub>.

В качестве одной из возможных причин подобной динамики трендов содержания в атмосфере CO и CH<sub>4</sub> предложены изменения во всей глобальной фотохимической системе, происходящие на фоне глобальных климатических изменений, в частности изменение соотношения «источники/стоки» для малых атмосферных примесей.

*Ключевые слова:* окись углерода, метан, общее содержание примесей, атмосферная спектроскопия, спутниковые методы, фоновые и загрязненные районы, тренды; carbon monoxide, methane, total column of components, atmospheric spectroscopy, satellite methods, background and contaminated areas, trends.

### Введение

Многочисленные исследования свидетельствуют об уменьшении антропогенных выбросов некоторых парниковых газов и загрязняющих примесей (например, CO, NO<sub>x</sub> и сажевого аэрозоля BC) в странах Европы и Юго-Восточной Азии, исключая Индию [1–4]. Начиная с конца прошлого века это уменьше-

ние сопровождается в целом отрицательными трендами общего содержания (ОС) CO, NO<sub>x</sub>, аэрозольных частиц (включая BC) и их приземных концентраций практически во всем Северном полушарии как над крупными городами, так и над большинством незагрязненных районов. Глобальное уменьшение ОС CO в [1–4] связывается в основном с уменьшением антропогенных эмиссий.

Моноксид углерода, или окись углерода, CO не относится к важнейшим парниковым газам и в последние годы ушел на второй план в изучении связи климатических изменений с глобальными и региональными вариациями состава атмосферы (особенно после начала уменьшения его антропогенных эмиссий). Тем не менее CO играет значительную роль в атмосферной фотохимии. В частности, он во многом определяет концентрацию радикала гидроксила OH — основного окислителя, который в условиях фоновой тропосферы приводит к разрушению озона [5, 6].

\* Вадим Станиславович Ракитин (vadim@ifaran.ru); Николай Филиппович Еланский (n.f.elansky@mail.ru); Наталья Владимировна Панкратова (n.pankratova@list.ru); Андрей Иванович Скороход (askorokhod@mail.ru); Анатолий Васильевич Джола (dzhola@ifaran.ru); Юрий Александрович Штабкин (yuryshtabkin@gmail.com); Пусай Ван (pewang@mail.iap.ac.cn); Генчен Ван (wgc@mail.iap.ac.cn); Анастасия Васильевна Васильева (av@ifaran.ru); Мария Владимировна Макарова (zaitis@troll.phys.spbu.ru); Евгений Иванович Гречко (eigrechko@gmail.com).

Общеизвестна связь эмиссий CO с выбросами других парниковых газов и загрязняющих примесей, таких как CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, аэрозоли [7, 8]. Приземная концентрация CO – один из важнейших параметров качества городского воздуха, не только из-за его токсичности, но и вследствие возможности образования опасных концентраций приземного озона при развитии фотохимического смога в крупных городах или в районах природных пожаров [9]. Считается, что мощности глобальных природных и антропогенных эмиссий окиси углерода примерно сопоставимы. Основным относительно постоянным природным источником атмосферного CO является окисление метана и неметановых углеводородов, в том числе биогенного происхождения [4, 5, 8]. Среди основных непостоянных источников атмосферного CO – природные пожары, выбросы от которых в отдельные годы могут достигать 25% от глобальных эмиссий [10, 11]. Главным антропогенным источником CO считается процесс горения, в том числе сжигание топлива на промышленных предприятиях и в двигателях внутреннего сгорания на транспорте.

Метан CH<sub>4</sub> – второй по степени климатического воздействия парниковый газ после CO<sub>2</sub>; скорость роста его концентрации в атмосфере существенно превышает скорость увеличения двуокиси углерода, особенно после 2007 г. [1, 3, 12]. Многие исследователи связывают этот рост с климатическими изменениями и увеличением эмиссий CH<sub>4</sub>. Поскольку природные источники метана превышают по мощности антропогенные, в [1, 12–14] отмечается положительная обратная связь глобального потепления с ростом природных эмиссий CH<sub>4</sub>.

Наши предыдущие работы были посвящены в основном изучению вариаций и долговременных трендов общего содержания CO в городах и фоновых районах [8, 15, 16]. В [17] отмечены положительные тренды ОС CO в осенние месяцы в незагрязненных окрестностях Москвы (Звенигород) и Санкт-Петербурга (Петергоф) в 2007–2014 гг. при существенном уменьшении антропогенных эмиссий крупных городов в этот же период.

Цель настоящего исследования – подтвердить или опровергнуть полученные нами результаты относительно начала роста ОС CO в ряде регионов, а также изучить динамику трендов CH<sub>4</sub> и сопоставить оценки трендов, полученные разными способами. Для этого были привлечены данные наземных спектроскопических измерений (спектрометры ИФА РАН, СПбГУ и измерительные ряды европейских станций NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change). Для исследования пространственного распределения трендов CO и CH<sub>4</sub> проведен анализ суточных данных спутниковых спектрометров MOPITT v06J и AIRS v6. Для проверки возможного влияния природных пожаров в Евразии на полученные значения трендов были использованы среднегодовые оценки количества и мощности пожаров, а также оценки среднегодовых эмиссий продуктов горения GFED v4.1 [18]. Кроме этого, использовались оценки эмиссий от пожаров, полученные независимым методом [19].

## 1. Методика и аппаратура

Для достижения поставленной цели использовались данные наземных спектроскопических измерений, в т.ч.:

– долговременные спектроскопические ряды данных наблюдений CO и CH<sub>4</sub> в пунктах Москва, Звенигород (ЗНС), Пекин, Зотино (ZOTTO), оснащенных однотипными дифракционными спектрометрами среднего разрешения (ИФА РАН) [8, 16, 20];

– данные станции Петергоф, полученные с помощью дифракционного спектрометра среднего разрешения и Фурье-спектрометра высокого разрешения (СПБГУ, с 2016 г. – станция NDACC Санкт-Петербург) [21, 22];

– данные наблюдений станций NDACC Кируна, Харестуа, Най Алезунд, Зуль, Бремен, Юнгфрау и др.; измерения проводились с помощью Фурье-спектрометров высокого разрешения (<http://www.ndsc.ncep.noaa.gov/sites/> и [23]).

Характеристики спектрометров, координаты пунктов и периоды наземных спектроскопических наблюдений приведены в табл. 1.

Спектрометры ИФА РАН калибровались между собой и со спектрометрами СПбГУ, а также косвенно со спектрометрами NDACC. Измерительные комплексы СПбГУ, применявшиеся в разные годы, кроме сравнения с приборами ИФА РАН проходили прямую калибровку между собой и спектрометрами NDACC [17, 24].

Для анализа пространственного распределения трендов исследуемых газов привлекались данные спутниковых спектрометров. Использовалась позднейшая версия спутникового продукта AIRS v6 (standard, только данные).

Спектрометр AIRS (Atmospheric InfraRed Sounder) запущен на борту спутника Aqua 4 мая 2002 г. Он предназначен для измерения влажности, температуры, характеристик облачного покрова и содержания парниковых газов в атмосфере. Основным элементом – орбитальный дифракционный спектрометр – записывает спектры атмосферного поглощения инфракрасного излучения Земли в спектральном диапазоне от 3,75 до 15,4 мкм [25–27] дважды в сутки с покрытием более 80% земной поверхности. Данные первичных уровней рассчитываются для ячеек примерно 45×45 км. В настоящей работе использовались данные третьего уровня (Level 3 v6, разрешение 1°×1°, только дневные измерения ОС CO и CH<sub>4</sub>) с восходящей орбиты (ascending, т.е. в 12:30–13:30 UTM для каждого пункта). Количество измерительных дней в году для каждой ячейки 1°×1° составляет ~300–320 для средних широт Евразии. Поэтому тренды ОС CO и CH<sub>4</sub> вычислялись на основе среднесезонного (или среднегодового) значения ОС CO и CH<sub>4</sub> для каждой ячейки с последующим построением линейной регрессии, расчетом ее параметров и статистических характеристик.

Предварительно в нашей работе [28] выполнено сопоставление спутниковых дневных данных ОС CO и CH<sub>4</sub> с наземными измерениями. Получено хорошее соответствие и корреляция для AIRS v6

Наземные пункты спектроскопических измерений ОС СО и СН<sub>4</sub>

Пункт наблюдений	Период	Типичный сезон, количество измерительных дней в году для СО/СН <sub>4</sub>	Координаты, с.ш./в.д./высота над у.м.	Принадлежность, регион
Звенигород	1998–2015	Круглогодично, 70–90/70–90	55,7°/36,8°/200 м	ИФА РАН, РФ, Московская обл.
Зотино	2008–2016	Июнь–август, 10–15/0	60,8°/89,4°/120 м	ИФА РАН, РФ, Красноярский край
Москва	1998–2015	Круглогодично, 70–90/0	55,7°/37,3°/200 м	ИФА РАН, РФ, центр г. Москва
Пекин	1998–2015	Октябрь–ноябрь, 15–20/0	39,97°/116,38°/80 м	ИФА РАН, ИФА КАН, КНР, г. Пекин
Петергоф	1998–2015	Круглогодично, 60–80/50–70	59,88°/29,82°/20 м	СПбГУ, РФ, Ленинградская обл.
Зуль	2003–2015	Апрель–сентябрь, 20–70/10–50	76,53°/68,74°/30 м	NDACC, Гренландия, г. Зуль
Кируна	2003–2015	Круглогодично, 50–100/50–100	67,8°/20,4°/420 м	NDACC, Швеция г. Кируна
Харестуа	2003–2014	Круглогодично, 30–60/30–60	60,2°/10,8°/600 м	NDACC, Норвегия
Най Алезунд	2003–2014	Март–октябрь, 20–40/20–40	78,9°/11,9°/15 м	NDACC, Норвегия, Шпицберген
Бремен	2003–2014	Круглогодично, 10–30/10–30	53,1°/8,8°/30 м	NDACC, Германия, промышленный район
Цугшпитце	2003–2014	Круглогодично, 30–50/30–50	47,42°/10,98°/2964 м	NDACC, Германия, Альпы
Юнгфрау	2003–2015	Круглогодично, 20–50/30–50	46,55°/7,98°/3850 м	NDACC, Швейцария, Альпы

( $R^2 = 0,50–0,85$ ) в фоновых условиях; при этом линейный коэффициент регрессии  $K = U_{gr}/U_{sat}$ , где  $U_{gr}$  – содержание примеси, измеренное с Земли,  $U_{sat}$  – спутниковое содержание, для AIRS v6 был близок к 1 для фоновых и незагрязненных условий и  $\geq 1,5$  в загрязненных условиях (1,5 для района Пекина и 1,5–3,0 в случаях природных пожаров). Таким образом, мы считаем приводимые ниже оценки трендов ОС СО, полученные с использованием спутниковых данных, репрезентативными для фоновых и слабозагрязненных условий; репрезентативность оценок трендов AIRS v6 для загрязненных условий подтверждается полученными нами результатами сопоставления с наземными данными.

## 2. Результаты

По данным наземных и спутниковых измерений, в период 2003–2015 гг. ОС СО убывало практически над всей территорией Евразии со скоростью 0,05–1,50%/год при использовании среднегодовых значений (рис. 1, а, цв. вкладка). Исключение составляют тропические районы Индийского и Тихого океанов: в 2014–2015 гг. катастрофические лесные пожары происходили в Индонезии, что повлияло на полученные распределения трендов для тропических широт. Наибольшая скорость уменьшения ОС СО характерна для района Пекина и всего Центрального Китая (до 1,5%/год). Это соответствует нашим оценкам для Пекина, полученным из данных наземных спектроскопических измерений [8, 17].

На рис. 1, б максимумам разброса трендов ОС СО соответствуют области природных пожаров 2014 и 2015 гг. в Индонезии и Восточной Сибири, внесшие наибольшую неопределенность в оценки. Аналогичные распределения, но с разрешением  $9^\circ \times 9^\circ$ , были получены на основе данных MOPITT v06J, однако ограниченный объем публикации не позволяет привести все полученные нами результаты. Региональные оценки трендов, сделанные на основе наблюдений обоих орбитальных спектрометров, согласуются между собой, а также качественно подтверждаются наземными данными в большинстве пунктов (табл. 2).

Однако вычисленные по среднегодовым значениям тренды показывают, что в период 2007–2015 гг. уменьшение ОС СО замедлилось практически над всем доменом. Следует отметить положительный тренд (до 0,3%/год) над центральными областями Сибири (рис. 2, а, цв. вкладка).

Аналогично были получены оценки трендов ОС СН<sub>4</sub> по данным AIRS v6 (рис. 2, цв. вкладка) и затем сопоставлены с локальными оценками на основе измерений станций NDACC (табл. 3). Скорость роста ОС СН<sub>4</sub> в большинстве районов Евразии после 2007 г. возросла. На рис. 3 представлены тренды ОС СН<sub>4</sub>, вычисленные с использованием среднегодовых значений  $1^\circ \times 1^\circ$ , отдельно для 2003–2015 (рис. 3, а) и для 2007–2015 гг. (рис. 3, б). Многие исследователи, объясняя начало быстрого роста концентраций метана после 2007 г., связали его с увеличением природных эмиссий метана из болот и тундры [4–6]. Обращаем внимание, что в полярных районах

**Тренды ОС СО по данным наземных и спутниковых (AIRS v6) измерений.  
Сезоны усреднения наземных и спутниковых данных совпадают**

Пункт наблюдений	Период	Сезон усреднения	Наземные спектрометры		AIRS v6		
			Тренд, %/год		Годы наблюдений	Тренд, %/год	
			Сезон	Год		Сезон	Год
Звенигород	1998–2015	16.09–30.11	-1,48	-1,33	2003–2015	-0,38	-0,75
	2007–2015		0,96	-0,59	2007–2015	0,16	-0,50
Петергоф	1998–2015	16.09–30.11	-1,05	-0,17	2003–2015	-0,38	-0,71
	2007–2015		0,77	-0,36	2007–2015	0,15	-0,41
Зотино	2008–2016	01.06–31.08	1,10		2003–2015	-0,10	-0,70
Пекин	1998–2015	01.10–30.11	-1,54		2003–2015	-2,50	-1,02
	2007–2015		-3,17		2007–2015	-5,03	-0,97
Москва	1998–2015	16.09–30.11	-3,12	-2,32	2003–2015	-0,38	-0,75
	2007–2015		-0,71	-2,10	2007–2015	0,16	-0,50
Зуль	2003–2015	Июль–сентябрь	-1,13	-1,81	2003–2015	-0,03	-0,33
	2007–2015		0,13	-1,34	2007–2015	0,64	-0,12
Кируна	2003–2015	Июль–октябрь	-1,14	-1,16	2003–2015	-0,47	-0,72
	2007–2015		0,47	-0,26	2007–2015	0,81	-0,22
Харестуа	2003–2014	Июль–октябрь	-0,59	-0,79	2003–2015	-0,42	-0,74
	2007–2014		1,56	0,35	2007–2015	0,77	-0,33
Най Алезунд	2003–2014	Июль–сентябрь	0,17	-0,66	2003–2015	-0,13	-0,64
	2007–2014		2,36	1,07	2007–2015	0,91	-0,31
Бремен	2003–2015	Июль–октябрь	-0,25	-0,05	2003–2015	-0,38	-0,81
	2007–2015		2,07	-0,52	2007–2015	0,50	-0,44
Цугшпитце	2003–2015	Июль–октябрь	0,26	-1,11	2003–2015	-0,46	-0,90
	2007–2015		3,63	1,78	2007–2015	0,44	-0,55
Юнгфрау	2003–2015	Июль–октябрь	-0,30	-0,92	2003–2015	-0,51	-0,90
	2007–2015		0,89	0,32	2007–2015	0,43	-0,52

Таблица 3

**Тренды ОС СН<sub>4</sub> по среднегодовым данным наземных и спутниковых измерений**

Пункт наблюдений	Период	Наземные спектрометры	AIRS v6	
		Тренд, %/год	Годы наблюдений	Тренд, %/год
Звенигород	2003–2015	0,36	2003–2015	0,19
	2007–2015	0,51	2007–2015	0,17
Петергоф	2005–2011	0,90	2003–2015	0,19
	2009–2014	0,30	2007–2015	0,22
	2009–2016	0,35		
Зотино			2003–2015	0,17
			2007–2015	0,13
	2008–2014	0,87 (июль)	2008–2014 (июль)	0,21
Пекин			2003–2015	0,25
			2007–2015	0,26
Зуль	2003–2015	0,31	2003–2015	0,17
	2007–2015	0,39	2007–2015	0,10
Кируна	2003–2015	0,32	2003–2015	0,17
	2007–2015	0,43	2007–2015	0,18
Харестуа	2003–2014	0,20	2003–2015	0,18
	2007–2014	0,40	2007–2015	0,22
Най Алезунд	2003–2014	0,32	2003–2015	0,16
	2007–2014	0,22	2007–2015	0,17
Бремен	2003–2015	0,65	2003–2015	0,18
	2007–2015	1,04	2007–2015	0,20
Цугшпитце	2003–2015	0,30	2003–2015	0,18
	2007–2015	0,38	2007–2015	0,18
Юнгфрау	2003–2015	0,23	2003–2015	0,20
	2007–2015	0,25	2007–2015	0,21

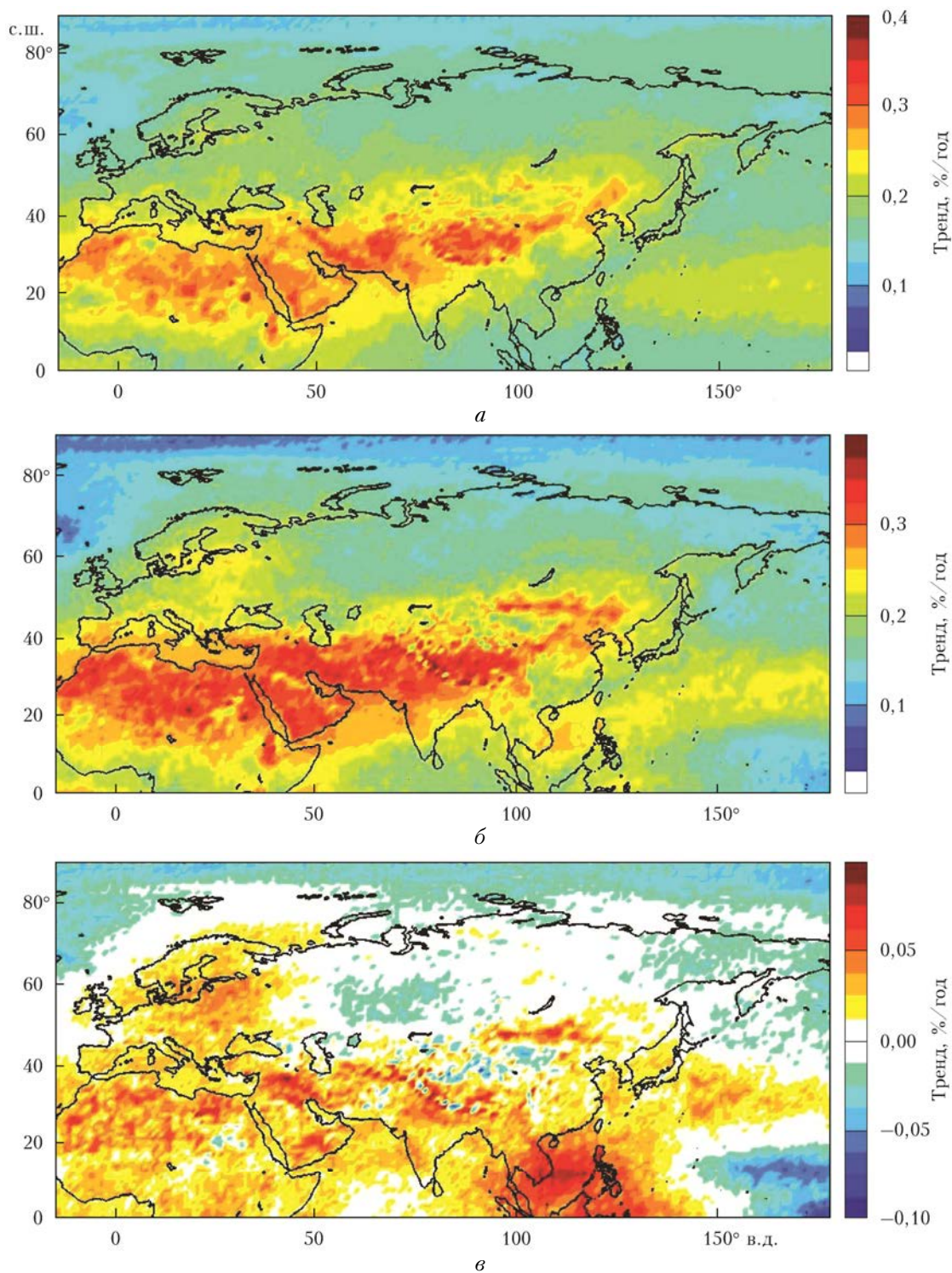


Рис. 3. Тренды ОС  $\text{CH}_4$  по среднегодовым данным AIRS v6, разрешение  $1^\circ \times 1^\circ$ : *a* – для 2003–2015 гг.; *б* – для 2007–2015 гг.; *в* – разность трендов, т.е. тренд (2007–2015 гг.) – тренд (2003–2015 гг.)

Восточной Евразии после 2007 г. тренды ОС  $\text{CH}_4$  практически не изменились, в отличие от южных районов Евразии и Северной Европы (рис. 3, *в* и табл. 3). Это подтверждается результатами исследования региональных тенденций эмиссий метана [29], согласно которым скорость увеличения общего содержания метана в 2003–2015 гг. составляла 0,1–0,4%/год

в зависимости от региона (за исключением станции NDACC Бремен – 0,65%/год), что соответствует глобальной оценке GAW (рост 0,3%/год) [1, 30]. Также отметим качественное согласие приводимых нами оценок увеличения скорости роста ОС  $\text{CH}_4$  после 2007 г. с данными NOAA ([www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends\\_ch4](http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends_ch4)) об ускорении роста глобальной

концентрации метана: 0,27%/год для 2003–2015 гг. и 0,34%/год для 2007–2015 гг. Спутниковые и наземные оценки трендов ОС CH<sub>4</sub> по среднегодовым значениям для отдельных пунктов также хорошо согласуются между собой (см. табл. 3).

Отметим существенные отличия сезонных распределений трендов ОС СО от среднегодовых. В особенности это относится к летне-осеннему периоду.

Для летнего (июнь–август) и осеннего (сентябрь–октябрь) сезонов 2007–2015 гг. (рис. 4, а и 4, б соответственно, цв. вкладка) отмечается рост ОС СО практически во всем исследуемом домене, включая Северную Европу. В Центральной Сибири скорость возрастания достигает 1,5%/год (в летние периоды 2007–2015 гг.), что отчасти можно объяснить эмиссиями от пожаров в отдельных регионах Сибири в 2012, 2014 и 2015 гг. Положительный тренд эмиссий от пожаров в Восточной Сибири в 2007–2015 гг. подтверждается данными GFED по домену Eastern North Eurasia (90–180° в.д., 42–75° с.ш.) (табл. 4). Наши оценки, выполненные по оригинальной методике [19], указывают на невозрастание эмиссий СО в этот период в этом же домене. В западной части Евразии (домен Central North Eurasia, 10–90° в.д., 42–75° с.ш.) тренды эмиссий от пожаров в этот период и вовсе отрицательны (см. табл. 4). Известно, что наибольшая интенсивность природных пожаров в Центральной Европе и Северной Евразии наблюдается в период с мая по август. Кроме того, время жизни СО в атмосфере не превышает 3 мес зимой [1, 3, 5] и 10–15 дней в теплые сезоны. Тем не менее и в осенние месяцы 2007–2015 гг. (см. рис. 4, б) практически во всем домене, включая Европу, зафиксированы положительные тренды ОС СО, хотя и меньшей величины (до 0,65%/год). Положительные тренды до 1,0–1,5%/год в тропических широтах обусловлены влиянием сильных природных пожаров в Индонезии в осенне-зимние месяцы 2014 и 2015 г.

Таблица 4

**Тренды пожарных эмиссий в Евразии. Домены Central North Eurasia (10–90° в.д., 42–75° с.ш.) и Eastern North Eurasia (90–180° в.д., 42–75° с.ш.) с 2003 г. по 2015 г. (GFED / настоящая работа)**

Годы	Тренд, %/год			
	Central North Eurasia		Eastern North Eurasia	
	СО	CH <sub>4</sub>	СО	CH <sub>4</sub>
<b>2003–2015*</b>	<b>-1,4/</b>	<b>-1,0/</b>	<b>-1,8/</b>	<b>-1,9/</b>
2003–2015	-0,9	-0,7	-3,0	-3,4
<b>2007–2015*</b>	<b>-3,4/</b>	<b>-3,8/</b>	<b>3,5/</b>	<b>3,2/</b>
2007–2015	-2,6	-2,4	-0,7	-1,4

\* Полу жирным выделены оценки, полученные с помощью GFED.

Оценки трендов ОС СО для летних и осенних месяцев, полученные нами по спутниковым данным, хорошо согласуются с аналогичными оценками, сделанными на основе данных станций NDACC Кируна, Харестуа и др. (Северная Европа) и для станций Бремена, Цугшпитце и Юнгфрау (см. табл. 1 и 2) Центральной и Южной Европы.

## Заключение

Приведенные данные позволяют сделать вывод, что тренды ОС СО в летние и осенние месяцы после 2007 г. изменили знак с отрицательного на положительный для всего исследуемого домена, кроме Китая. Следовательно, можно утверждать, что глобальный СО перешел в стадию стабилизации или даже накопления. Изменение этой направленности не может быть объяснено только вариациями эмиссий от природных пожаров или антропогенными эмиссиями. В 2007–2015 гг. выраженного роста пожарных эмиссий в средних и высоких широтах Европы и Азии не наблюдалось (см. выше и табл. 4), а антропогенные эмиссии СО уменьшались [1, 2, 4], в т.ч. по нашим данным для мегаполисов Москвы, Петербурга и Пекина [8, 17]. Можно предположить, что обсуждаемое изменение направленности трендов связано с изменением мощности природных источников или стоков. Об отсутствии значимых трендов гидроксила – основного окислителя СО сообщается в [31]. По нашему мнению, причиной изменения трендов СО могут являться процессы его образования при окислении метана и неметановых углеводородов, в т.ч. биогенного происхождения, динамика трендов которых носит положительный характер после 2007 г. Глобальное потепление и изменение климата могут также привести к изменению соотношения «источники/стоки» СО в атмосфере. Для проверки этого предположения необходимо всестороннее исследование трендов эмиссий упомянутых углеводородов и уточненные данные о трендах гидроксила.

Авторы статьи благодарят коллектив кафедры физики атмосферы СПбГУ и лично ее руководителя проф. Ю.М. Тимофеева за предоставленные результаты спектроскопических измерений содержания СО в Петергофе, а также за обсуждение полученных результатов. Кроме этого, авторы благодарят научные коллективы станций NDACC Кируна, Харестуа, Най Алезунд, Зуль, Бремен, Юнгфрау, Цугшпитце за возможность использования данных их измерений.

Настоящая работа выполнена при поддержке проекта РФФИ № 16-05-00287 (в части проведения измерений в Москве и Звенигороде), а также при поддержке проектов РФФ №14-49-00049 (проведение измерений в Пекине, анализ данных измерений пунктов ИФА РАН и NDACC и получение распределения трендов) и РФФ № 16-17-10275 (анализ наземных и спутниковых данных по Московскому региону). Экспериментальные исследования СПбГУ (пункт Петергоф) выполнены при поддержке гранта СПбГУ 11.42.1065.2016 (Мероприятие 6).

1. IPCC (2013) Climate Change 2013: The Physical Science Basis (IPCC, 2013) / T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (eds.). Cambridge; New York.
2. Pommier M., McLinden C.A., Deeter M. Relative changes in CO emissions over megacities based on observations from space // Geophys. Res. Lett. 2013. V. 40. P. 1–6. DOI: 10.1002/grl.50704.
3. Dlugokencky E., Crotwell A., Masarie K., White J., Lang P., Crotwell M. NOAA measurements of long lived

- greenhouse gases // Asia-Pacific GAW Greenhouse Gases. Newsletter. KMA, 2013. V. 4. P. 6–9.
4. WMO/IGAC Impacts of Megacities on Air Pollution and Climate. GAW Rep. No. 205. 2012. 314 p.
  5. Novelli P.C., Masarie K.A., Lang P.M. Distributions and recent changes in carbon monoxide in the lower troposphere // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103, N 19. P. 015–033.
  6. Thompson A.M., Cicerone R.J. Possible perturbations to atmospheric CO, CH<sub>4</sub>, and OH // *J. Geophys. Res.* D. 1986. V. 91, N 10. P. 10853–10864. DOI: 10.1029/JD091iD10p10853.
  7. Wunch D., Wennberg P.O., Toon G.C., Keppel-Aleks G., Yavin Y.G. Emissions of greenhouse gases from a North American megacity // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. DOI: 10.1029/2009GL039825.
  8. 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 аэрозолем // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана.* 2015. Т. 51, № 1. С. 1–12.
  9. Khalil M.A.K., Pinto J.P., Shearer M.J. Preface Atmospheric carbon monoxide // *Chemosphere: Global Change Sci.* 1999. V. 1, N 1–3. P. 1–375.
  10. Брасье Г., Соломон С. Аэрономия средней атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1987. 413 с.
  11. Yurganov L.N., Duchatelet P., Dzhola A.V., Edwards D.P., Hase F., Kramer L., Mahieu E., Mellqvist J., Notholt J., Novelli P.C., Rockmann A., Scheel H.E., Schneider M., Schulz A., Strandberg A., Sussmann R., Tanimoto H., Velasco V., Drummond J.R., Gille J.C. Increased Northern hemispheric carbon monoxide burden in the troposphere in 2002 and 2003 detected from the ground and from space // *Atmos. Chem. Phys.* 2005. V. 5, N 2. P. 563–573.
  12. Hausmann P., Sussmann R., Smale D. Contribution of oil and natural gas production to renewed increase in atmospheric methane (2007–2014): Top-down estimate from ethane and methane column observations // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16. P. 3227–3244. DOI: 10.5194/acp-16-3227-2016.
  13. Bousquet P., Ringeval B., Pison I.E.J., Brunke E.-G., Carouge C., Chevallier F., Fortems-Cheiney A., Frankenberg C., Hauglustaine D.A., Krummel P.B., Langenfelds R.L., Ramonet M., Schmidt M., Steele L.P., Szopa S., Yver C., Viovy N., Ciais P. Source attribution of the changes in atmospheric methane for 2006–2008 // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. V. 11. P. 3689–3700. DOI: 10.5194/acp-11-3689-2011.
  14. Kirschke S., Bousquet P., Ciais P., Saunoy M., Canadell J.G., Dlugokencky E.J., Bergamaschi P., Bergmann D., Blake D.R., Bruhwiler L., Cameron-Smith P., Castaldi S., Chevallier F., Feng L., Fraser A., Heimann M., Hodson E.L., Houweling S., Josse B., Fraser P.J., Krummel P.B., Lamarque J.-F., Langenfelds R.L., Le Queré C., Naik V., O'Doherty S., Palmer P.I., Pison I., Plummer D., Poulter B., Prinn R.G., Rigby M., Ringeval B., Santini M., Schmidt M., Shindell D.T., Simpson I.J., Spahni R., Steele L.P., Strode S.A., Sudo K., Szopa S., van der Werf G.R., Voulgarakis A., van Weele M., Weiss R.F., Williams J.E., Zeng G. Three decades of global methane sources and sinks // *Nat. Geosci.* 2013. V. 6. P. 813–823. DOI: 10.1038/ngeo1955.
  15. Yurganov L.N., Rakitin V., Dzhola A., August T., Fokeyeva E., George M., Gorchakov G., Grechko E., Hanon S., Karpov A., Ott L., Semutnikova E., Shumsky R., Straw 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.
  16. 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.
  17. Wang P., Elansky N.F., Timofeev Yu.M., Wang Gengchen, Golitsyn G.S., Makarova M.V., Rakitin V.S., Stabkin Yu.A., Skorokhod A.I., Grechko E.I., Fokeyeva E.V., Safronov A.N. A study of the long-term trends of CO total column for urban and background regions using ground-based and satellite spectroscopic measurements // *Adv. Atmos. Sci.* 2017. (In print).
  18. Van der Werf G.R., Randerson J.T., Giglio L., Collatz G.J., Mu M., Kasibhatla P.S., Morton D.C., DeFries R.S., Jin Y., van Leeuwen T.T. Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997–2009) // *Atmos. Chem. Phys.* 2010. V. 10. P. 11707–11735. DOI: 10.5194/acp-10-11707-2010.
  19. Vasileva A.V., Moiseenko K.B. Methane emissions from 2000 to 2011 wildfires in Northeast Eurasia estimated with MODIS burned area data // *Atmos. Environ.* 2013. V. 71. P. 115–121.
  20. Dianov-Klokov V.I., Yurganov L.N., Grechko E.I., Dzhola A.V. Spectroscopic measurements of atmospheric carbon monoxide and methane. 1: Latitudinal distribution // *J. Atmos. Chem.* 1989. V. 8, N 2. P. 139–151.
  21. Макарова М.В., Поберовский А.В., Осунов С.И. Временная изменчивость общего содержания СО в атмосфере вблизи Санкт-Петербурга // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана.* 2011. Т. 47, № 6. С. 801–808.
  22. Gavrilov N.M., Makarova M.V., Poborovskii A.V., Timofeyev Yu.M. Comparisons of CH<sub>4</sub> ground-based FTIR measurements near Saint-Petersburg with GOSAT observations // *Atmos. Meas. Technol.* 2014. V. 7. P. 1003–1010. DOI: 10.5194/amt-7-1003-2014.
  23. Sepúlveda E., Schneider M., Hase F., Barthlott S., DuBravica D., García O.E., Gomez-Pelaez A., González Y., Guerra J.C., Gisi M., Kohlhepp R., Dohe S., Blumenstock T., Strong K., Weaver D., Palm M., Sadeghi A., Deutscher N.M., Warneke T., Notholt J., Jones N., Griffith D.W.T., Smale D., Brailsford G.W., Robinson J., Meinhardt F., Steinbacher M., Aalto T., Worth D. Tropospheric CH<sub>4</sub> signals as observed by NDACC FTIR at globally distributed sites and comparison to GAW surface in situ measurements // *Atmos. Meas. Technol.* 2014. V. 7. P. 2337–2360. DOI: 10.5194/amt-7-2337-2014.
  24. Кашин Ф.В., Каменоградский Н.Е., Гречко Е.И., Джола А.В., Поберовский А.В., Макарова М.А. Сравнение различных методик наземных спектроскопических измерений общего содержания метана в атмосфере // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана.* 2001. Т. 37, № 3. С. 339–345.
  25. Aumann H.H., Chahine M.T., Gautier C., Goldberg M., Kalnay E., McMillin L., Revercomb H., Rosenkranz P.W., Smith W.L., Staelin D., Straw 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, N 2. P. 253–264.
  26. McMillan W.W., Evans K.D., Barnett 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.
  27. AIRS/AMSU/HSB Version 6 Level 2, Product User Guide. Ed. by E.T. Olsen. URL: <http://disc.sci.gsfc.nasa.gov>

- gov/AIRS/documentation/v6\_docs/v6releasedocs-1/V6\_L2\_Product\_User\_Guide.pdf
28. *Ракитин В.С., Штабкин Ю.А., Еланский Н.Ф., Панкратова Н.В., Скороход А.И., Гречко Е.И., Сафронов А.Н.* Результаты сопоставления спутниковых измерений общего содержания CO, CH<sub>4</sub> и CO<sub>2</sub> с наземными спектроскопическими данными // *Оптика атмосф. и океана*. 2015. Т. 28, № 9, С. 816–824; *Rakitin V.S., Shtabkin Yu.A., Elansky N.F., Pankratova N.V., Skorokhod A.I., Grechko E.I., Safronov A.N.* Comparison results of satellite and ground-based spectroscopic measurements of CO, CH<sub>4</sub>, and CO<sub>2</sub> total contents // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 6, P. 816–824.
29. *Thompson R.L., Stohl A., Lund Myhre C., Sasakawa M., Machida T., Aalto T., Dlugokencky E., Worthy D., Skorokhod A.* Methane fluxes in the high northern latitudes estimated using a Bayesian atmospheric inversion // *Geophys. Res. Abstr.* 2016. V. 18. DOI: 10.5194/acp-17-3553-2017.
30. *The World Data Centre for Greenhouse Gases (WDCGG)*. URL: <http://ds.data.jma.go.jp/gmd/wdcgg/>
31. *Jiang Z., Worden J.R., Worden H., Deeter M., Jones D.B.A., Arellano A.F., Henze D.K.* A fifteen year record of CO emissions constrained by MOPITT CO observations // *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 2016. DOI: 10.5194/acp-2016-811.

*V.S. Rakitin, N.F. Elansky, N.V. Pankratova, A.I. Skorokhod, A.V. Dzhola, Yu.A. Shtabkin, P. Wang, G. Wan, A.V. Vasilieva, M.V. Makarova, E.I. Grechko.* Investigation of trends of CO and CH<sub>4</sub> total column over Eurasia based on the analysis of ground and orbital spectroscopic measurements.

Trends of CO and CH<sub>4</sub> total column (TC) are estimated from AIRS spectrometer data for the "Eurasia" domain (0–180° E, 0–85° N) for different time periods and seasons. The results are compared with similar estimates obtained from ground-based spectroscopic measurements at IAP RAS stations (ZSS, Zotto, and Beijing), st. Peterhof of St. Petersburg State University, and NDACC stations located in the test domain. According to the findings, the CO TC over Northern Eurasia generally decreased during the period 2003–2015 with a rate of 0.05–1.5%/year depending on the region, while the CH<sub>4</sub> TC increased at a rate of 0.16–0.65%/year. After 2007, there is a trend toward an increase in CO TC in the summer and autumn months in most of mid- and high-latitude Eurasia background areas, as well as an increase in CH<sub>4</sub> TC growth rate. Positive trends in CO cannot be explained by the growth of emissions from fires or anthropogenic emissions. Thus, one of possible causes may be changes in the entire global photochemical system occurring against the backdrop of global climate change, in particular, changes in the "sources/sinks" ratio for small atmospheric components.