# СХОДСТВО СОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ФОНОВЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ МЕТАНА В ПРИПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ НА РАЗЛИЧНЫХ ШИРОТАХ

# *С.М. Семенов* <sup>1,2)</sup>

<sup>1)</sup> Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля, Россия, 107258, г. Москва, ул. Глебовская, д. 206; SergeySemenov1@yandex.ru

<sup>2)</sup> Институт географии РАН, Россия, 119017, Москва, Старомонетный пер., дом 29

Реферат. Проанализированы изменения концентраций метана в приповерхностном слое по среднемесячным данным Глобальной атмосферной пробоотборной лаборатории (Global Atmospheric Sampling Laboratory, GASLAB), Австралия. Фляжечные измерения проводились на глобальной сети станций Научной и промышленной исследовательской организации Содружества наций (CSIRO). В этой работе использованы данные в основном за 1991-2014 гг. Изменения характеризовались в годовом масштабе времени – годовыми скользящими средними, а в сезонном масштабе времени – двухмесячными скользящими средними, из которых вычтены годовые скользящие средние. В годовом масштабе времени, после удаления систематических различий в уровнях СН<sub>4</sub>, тенденции изменений на всех станциях оказались сходными, причем для станций Южного полушария соответствующие кривые различаются всего на несколько млрд<sup>-1</sup>. В сезонном масштабе времени также обнаружено сходство изменений на всех станциях. Наблюдаемые колебания имеют сезонную цикличность, их форма устойчива. Для разных станций обнаружены сильные корреляционные связи. Однако они проявляются лишь при определенных сдвигах во времени, учитывающих сезонность. Увеличение уровней метана наблюдается в холодный период года, а уменьшение – в теплый. Характер этих изменений совместим с предположением о том, что их причина - сезонные изменения содержания гидроксил-радикалов в нижней атмосфере.

**Ключевые слова.** Современные изменения, глобальный уровень, концентрации, приповерхностный слой, метан, сходство, разные широты.

## SIMILARITY OF PRESENT-DAY VARIATIONS IN METHANE BACKGROUND CONCENTRATIONS IN THE SURFACE LAYER OF THE ATMOSPHERE AT DIFFERENT LATITUDES

S.M. Semenov<sup>1,2)</sup>

Yu. A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology,
20B. Glebovskaya str., 107258, Moscow, Russia; SergeySemenov1@yandex.ru

<sup>2)</sup> Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, 29, Staromonetny lane, 109017, Moscow, Russia

Abstract. Variations in methane concentrations in the surface layer are studied using monthly averages provided by the Global Atmospheric Sampling Laboratory

(GASLAB), Australia. Flask measurements have been carried out at the network of monitoring stations of the Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO). Mainly data of 1991–2014 are analyzed in this paper. On the yearly time scale, the variations are studied using yearly running averages. Differences between bimestrial running averages and yearly running averages are employed for the analysis of variations on the seasonal time scale. On the yearly scale, after the elimination of systematic differences in CH<sub>4</sub> levels, trends became similar at all stations. For the stations of the Southern Hemisphere, respective curves differ by several ppb only. The similarity of variations at all stations was found also on the seasonal scale. The oscillations observed have seasonal cyclicality and the stable shape. Strong correlations are found for different stations. However, the correlations are manifested only after respective time shifts accounting for seasonality have been applied. Methane levels are increased in the cold period of year and decreased in the warm period. Such type of variations supports the following hypothesis: CH<sub>4</sub> variations on the seasonal time scale are caused by seasonal changes in hydroxyl burden in the lower atmosphere.

**Keywords**. Present-day variations, global level, concentrations, surface layer, methane, similarity, different latitudes.

### Введение

Среди парниковых газов, в значительном количестве поступающих в атмосферу в ходе хозяйственной деятельности, метан является вторым парниковым газом по вкладу в современное усиление парникового эффекта на Земле (Myhre et al, 2013, р. 677); первый в ряду – углекислый газ. По всем удельным показателям парниковой эффективности – и в расчете на тонну дополнительного выброса вещества, и в расчете на заданное малое увеличение содержания в атмосфере – метан превосходит углекислый газ на порядок. Это свойство метана, а также перспективы увеличения его антропогенных эмиссий и вклада в усиление парникового эффекта на Земле в будущем (Meinshausen et al, 2011; Collins et al, 2013, р. 1046), указывают на необходимость внимательной оценки изменений его глобальных концентраций и факторов, их определяющих.

Цели настоящей статьи:

 – охарактеризовать вариации фоновых уровней содержания метана в приповерхностном слое атмосферы в полярных, умеренных и тропических широтах в годовом и сезонном масштабах времени;

– выявить сходство и различия этих вариаций, в том числе в Северном и Южном полушариях.

# Данные и методы

Фоновое содержание основных парниковых газов в приповерхностном слое атмосферы – предмет мониторинга на глобальных измерительных сетях. Одна и них – сеть фляжечных измерений (flask measurements) Научной и про-

### С.М. Семенов

мышленной исследовательской организации Содружества наций (The Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, сокращенно -CSIRO). Это – сеть пробоотборных станций, т.е. на них определенные объемы воздуха отбираются в специальные емкости (фляги, flask в англоязычном оригинале), а затем анализируются в лабораторных условиях в Глобальной атмосферной пробоотборной лаборатории (GASLAB), Австралия. Данные и работы, посвященные методическим вопросам измерений содержания метана (см., например, (Francey et al, 2003)), а также анализу данных, можно найти по http://cdiac.ess-dive.lbl.gov/trends/co2/modern co2.html\_( $\rightarrow$ DATA,  $\rightarrow$ ссылке CSIRO). В этой многолетней работе участвовали D.M. Etheridge, P.B. Krummel, R.L. Langenfelds, L.P. Steele и некоторые другие ведущие специали-**CSIRO** В ланной статье использован архив <CSIRO gaslab сты data Jul2015.zip> с этого ресурса. Данные мониторинга концентраций с этих и других станций можно также найти на pecypce https://ds.data.jma.go.jp/gmd/ wdcgg/cgi-bin/wdcgg/catalogue.cgi Мирового центра ВМО по парниковым газам (WMO World Data Centre for Greenhouse Gases).

В табл. 1 приведены географические характеристики пробоотборных пунктов сети CSIRO (в дальнейшем будем их называть «станции»). В этой работе будут использоваться данные с пяти станций, расположенных в Северном полушарии, и шести – в Южном полушарии. В табл. 1 приведены также отрезки времени, к которым относятся ряды среднемесячных концентраций метана, полученные по результатам измерений на этих станциях.

Таблица 1. Характеристики расположения станций сети фляжечных измерений Научной и промышленной исследовательской организации Содружества наций (CSIRO) и временное покрытие их рядов месячных данных о концентрациях метана. Высоты приведены в метрах

над уровнем моря (м н.у.м.), широта и долгота - в градусах. Источник: http://cdiac.ess- dive.lbl.gov/trends/co2/modern_co2.html (→DATA, → CSIRO)									
Код станции	Название и расположение станции	Широта	Долгота	Высота станции	Высота отбора проб	Временной отрезок			
ALT	Alert, Canada	82.50	-62.33	200	210	1991-2014			
ESP	Estevan Point, Canada	49.38	-126.53	6.53 7 4		1993-2002			
SIS	Shetland Islands, UK	60.08	-1.25	30	33	1992-2003			
MLO	Mauna Loa, USA	19.53	-155.57	3397	3435	1991-2014			
CRI	Cape Rama, India	15.08	73.83	60	66	1993-2002 2009-2013			
CFA	Cape Ferguson, Australia	-19.28	147.05	2	5	1991-2014			
CGO	Cape Grim, Australia	-40.68	144.69	94	164	1984-2014			
СҮА	Casey, Antarctica	-66.28	110.51	47	55	1997-2014			
MAA	Mawson, Antarctica	-67.61	62.86	32	42	1984-2014			
MQA	Macquarie Island, Australia	-54.48	158.96	6	13	1990-2014			
SPO	South Pole, Antarctica	-89.98	-24.8	2837	2847	1991-2014			

По замыслу эти станции не находятся под влиянием каких-то конкретных существенных источников эмиссии метана, т.е. эта сеть измеряет фоновые глобальные уровни содержания метана<sup>1)</sup>. Это означает, что уровни содержания CH<sub>4</sub> в этих пунктах определяются глобальными процессами переноса и перемешивания в атмосфере, а также естественного стока метана. Напомним, что источники метана находятся на земной поверхности, а его разрушение происходит в основном в атмосфере во взаимодействиях с гидроксил-радикалом в тропосфере и атомарным хлором в стратосфере (Cicerone, Oremland, 1988; Кароль, Киселев, 2004; Дзюба, Елисеев, Мохов, 2012; Naik et al., 2013; Vulgarakis et al., 2013; Елисеев, 2018).

Мы использовали среднемесячные данные о содержании метана (архив <CSIRO\_gaslab data\_Jul2015.zip> был скачан с интернет-ресурса http:// cdiac.ess-dive.lbl.gov/trends/co2/modern\_co2.html (→DATA, → CSIRO) в марте 2018 г.). Временное покрытие этих данных достаточно непрерывное. Лишь на станции CRI был многолетний перерыв в измерениях. Однако, даже в те годы, когда измерения проводились, данные за некоторые месяцы также иногда отсутствуют. Для удобства алгоритмической обработки данных в этой работе такие пропуски были заполнены с использованием процедуры, изложенной в работе (Семенов, Гельвер, 2002). Напомним кратко эту процедуру.

Рассмотрим две матрицы:  $V = (v_{ij})$  и  $F = (f_{ij})$ , где i = 1,..., I, а j = 1,..., J. Матрица V представляет собой собственно массив данных измерений, а матрица F характеризует наличие или же отсутствия данных:  $f_{ij} = 1$ , если данное  $v_{ij}$  в наличии, и  $f_{ij} = 0$ , если оно отсутствует. В данной работе индекс iследует воспринимать как порядковый номер года, для которого есть оценки среднемесячных значений за какие-то месяцы, а j – порядковый номер месяца в календарном году. Данные представляются следующем виде:

$$v_{ij} = a_i + b_j + \theta_{ij}$$

где  $a_1,..., a_I$  и  $b_1,..., b_J$  – неизвестные параметры, а  $\theta_{ij}$  – случайные уклоне ния (центрированные случайные величины);  $\sum_{j=1}^{J} b_j = 0$ . Переменные aимеют смысл среднегодовых значений, а переменные b – центрированного годового хода среднемесячных значений (J = 12). Неизвестные параметры находятся методом наименьших квадратов. Если элемент  $v_{ij}$  в исходном массиве отсутствует, то вместо него в дальнейшем анализе используется сумма  $(a_i + b_j)$ .

Для каждой станции, исходя из ее ряда среднемесячных концентраций, строились три производных ряда (иллюстрация дана на рис. 1), которые будут обозначатся латинскими символами *A*, *B* и *B*-*A*:

 A) ряд, представляющий скользящие среднегодовые значения, т.е. средние за последовательные 12 месяцев; такое среднегодовое значение относилось к 0 ч 1-го числа 7-го месяца, т.е. границе между 6-м и 7-м месяцем;

<sup>&</sup>lt;sup>1)</sup> Позже будет показано, что для некоторых станций это не совсем так.

*B*) ряд, представляющий скользящие среднедвухмесячные значения; для этого же срока его элемент – среднее за 6-й и 7-й месяцы;

В-А) разность рядов В и А.



Рисунок 1. На двух шкалах, представляющих «скользящую» совокупность 12-ти последовательных месяцев, выделены серым цветом отрезки времени, которые использовались для построения элементов рядов *A* (верхняя шкала) и *B* (нижняя шкала); построенные элементы рядов относятся к началу 7-го месяца

При построении рядов типа *A* и *B* различия в продолжительности месяцев календарного года не учитываются.

Далее изменчивость концентрации в годовом масштабе времени характеризуется рядом A, а изменчивость в сезонном масштабе времени — рядом B-A. Они далее будут упоминаться как «ряд типа A» и «ряд типа B-A».

При десятичном представлении моментов времени в годах, т.е. времени, прошедшего с нулевого момента, в этой работе до десятичного разделителя указывается предыдущий год: например, середина 2018 г. есть 2017.5 г.

При вычислении взаимных корреляций рядов для различных сдвигов во времени на  $\tau$  месяцев будет использоваться следующая терминология. При оценке корреляций всегда будет рассматриваться <u>упорядоченная</u> пара рядов  $\{X(t)\}$  и  $\{Y(t)\}$ . Первый из рядов  $\{X(t)\}$  сдвигаться не будет, а сдвиг второго будет осуществляться путем перехода к ряду  $\{Y(t + \tau)\}$ . При  $\tau > 0$  этот сдвиг будет называться «сдвигом против времени на  $\tau$  месяцев», а при  $\tau < 0$  этот сдвиг будет называться «сдвигом по времени на  $|\tau|$  месяцев»<sup>2)</sup>. Коэффициент взаимной корреляции оценивается по обычной формуле для рядов  $\{X(t)\}$  и  $\{Z(t)\}$ , где  $Z(t) = Y(t + \tau)$ . Разумеется, при оценке используются лишь те моменты времени t, для которых элементы рядов имеются. Тот сдвиг  $\tau$ , -5 <  $\tau$  < 6, при котором корреляция максимальна, называется оптимальным сдвигом.

### Результаты и обсуждение

Для сравнения изменений концентрации метана <u>в годовом масштабе времени</u> на различных станциях ряды типа *A* (т.е. скользящие годовые средние) были преобразованы следующим образом. Для каждой станции (обозначим ее общим символом SSS) были выделены совокупности месяцев, за которые в рядах типа *A* имелись данные для этой станции и станции ALT. Далее, для

<sup>&</sup>lt;sup>2)</sup> При  $\tau > 0$  ряд {*Y*(*t*)} сдвигается в сторону более ранних дат, т.е. против течения времени, а при  $\tau < 0$  – в сторону более поздних дат, т.е. по течению времени.

обоих рядов были вычислены средние арифметические элементов для этих совокупностей месяцев и разность  $\Delta_{ALT}$  этих средних для станции ALT<sup>3)</sup> и станции SSS. Эти значения приведены в табл. 2.

**Таблица 2.** Систематические различия  $\Delta_{ALT}$  в значениях концентраций метана на станции ALT и других станциях, млрд<sup>-1</sup>

Код станции	SIS	ESP	MLO	CRI	CFA	CGO	MQA	СҮА	MAA	SPO
$\Delta_{ALT}$	8.83	13.86	69.03	31.41	124.57	129.58	129.09	128.16	129.85	129.87

По значениям  $\Delta_{ALT}$ , приведенным в табл. 2, видно, что фоновые уровни метана заметно различаются на станциях Северного полушария, и они значительно превосходят уровни на станциях Южного полушария. Чтобы компенсировать эти систематические различия, к элементам ряда типа A для каждой станции было прибавлено значение  $\Delta_{ALT}$ , вычисленное для этой станции. Тем самым систематические различия скомпенсированы, и можно видеть собственно временные тренды.

На рис. 2а представлены полученные ряды для шести станций Южного полушария. Видно, что для них изменения во времени содержания метана весьма сходны – некоторые кривые для полярных станций практически неразличимы на рисунке. В целом отличия очень небольшие – в пределах нескольких млрд<sup>-1</sup>. Поэтому целесообразно построить усредненный ряд SH\_AV для сравнения с рядами типа A станций Северного полушария. При этом осреднении использовались данные за 1991-2014 гг.; более короткий ряд со станции СҮА не использовался.



<sup>&</sup>lt;sup>3)</sup> Станция ALT (Alert, Канада) выбрана здесь просто как самая высокоширотная станция Северного полушария.



Рисунок 2. Изменения содержания метана (млрд<sup>-1</sup>) – годовые скользящие средние; удалены систематические различия в концентрациях по отношению к станции ALT, что отражено в легенде добавлением символа «1» к коду станции (например, «SPO-1»): а) станции Южного полушария; б) станции Северного полушария и средний для Южного полушария ряд SH\_AV; в) то же, что и б), но без станции CRI

На рис. 26 представлен ряд SH\_AV (черная жирная линия), а также ряды для пяти станций Северного полушария. На рисунке видно, что в целом тенденции изменения концентрации метана на этих станциях в годовом масштабе времени сходны с тенденцией, наблюдаемой в Южном полушарии. Однако наблюдаются заметные многолетние отклонения, достигающие 10 -20 млрд<sup>-1</sup>. Исключение составляет тропическая станция Саре Rama (темно-синяя линия), расположенная в Индии. Отклонения от средней линии для Южного полушария, наблюдаемые на этой станции, более значительны. Анализ данных этой станции осложняется тем, что измерения там длительный период времени в 2000х годах не проводились. На рис. 2в эта станция удалена.

На рис. За представлены ряды типа *B-A* для двух станций Южного полушария – Mawson и Cape Grim. Они характеризуют изменчивость концентраций <u>в</u> <u>сезонном масштабе времени</u>. Эти станции выбраны здесь для иллюстрации потому, что измерения метана там наиболее продолжительные – ведутся с 1984 г. Оценка коэффициента корреляции – более 0.99; амплитуды близки. Отметим годовую цикличность и устойчивую форму колебаний с максимумами в холодное время года и минимумами в теплое.



Рисунок 3. Девиации концентрации метана на станциях Южного полушария, млрд<sup>-1</sup>; сезонный масштаб времени: а) на станциях МАА и СGO; цвета отличаются от принятых на рис. 2, чтобы обеспечить контрастность изображения; б) на станциях CFA и SPO (ряд станции SPO сдвинут на 1 месяц против времени)

Высокое сходство колебаний концентрации метана в сезонном масштабе времени наблюдается на всех станциях Южного полушария. Оценки коэффициентов корреляции рядов типа *B-A* станций МАА, СҮА, МQA, СGO и ряда станции SPO (Южный полюс) не менее 0.99, а для ряда тропической (!) станции CFA и станции SPO не менее 0.95. Если для первых четырех станций никаких сдвигов во времени при вычислении коэффициента корреляции не делалось, то для станции CFA при оценке корреляции с рядом станции SPO последний был сдвинут на 1 месяц против времени. На рис. Зб представлены эти ряды типа *B-A* для станций CFA и SPO.

Ряд типа *B-A*, построенный по данным высокоширотной полярной станции Alert (ALT, 82.5° с.ш.), также имеет высокое корреляционное сходство с рядами всех станций Южного полушария. Значения коэффициента корреляции рядов с этих станций с рядом со станции Alert следующие: 0.92 для SPO, 0.91 для MAA, 0.91 для СҮА, 0.93 для MQA и 0.89 для СFA. Однако, чтобы добиться такого сходства, необходим сдвиг ряда ALT на 5 месяцев против времени. На рис. 4а представлены данные для станции ALT и станции SPO (Южный полюс), а на рис. 46 - для станции ALT и тропической станции CFA



**Рисунок 4.** Девиации концентрации метана, млрд<sup>-1</sup>; сезонный масштаб времени: а) на станциях ALT и SPO; б) на станциях ALT и CFA. Ряд станции ALT сдвинут на 5 месяцев против времени

Между рядами типа *B-A* станций Северного полушария и рядом станции ALT также существует довольно тесная корреляционная связь. Коэффициенты корреляции следующие: 0.83 для станции ESP, 0.84 для станции SIS, 0.75 для станции MLO и 0.81 для станции CRI. При этом никаких временных

сдвигов не требуется, за исключением случая тропической станции CRI – ряд станции ALT необходимо сдвинуть на 1 месяц против времени.

В табл. 3 приведены оценки коэффициентов корреляции рядов типа *B-A* для всех рассматриваемых 11 станций. Цветом выделены группы станций Южного полушария и Северного полушария. Видно, что внутри групп значения коэффициентов корреляции высокие. Для станций, расположенных в полярных и умеренных широтах они достигаются без сдвигов. По мере приближения к тропическим широтам оптимальный сдвиг составляет 1 месяц. Корреляции рядов типа *B-A* для станций разных групп также довольно высоки. Однако оптимальные сдвиги достигают 5 месяцев. Напомним, что при определении сдвига всегда рассматривается упорядоченная пара станций. В табл. 3 сдвиг приведен для ряда станции, указанной в столбце. Например, для станций SPO и CFA коэффициент корреляции их рядов типа *B-A* составляет 0.95 при условии, что ряд станции CFA сдвинут на 1 месяц по времени.

			~			67. L	~ <b>D</b> I				
	SPO	MAA	СҮА	MQA	CGO	CFA	CRI	MLO	ESP	SIS	ALT
SPO	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99	0.95	0.88	0.74	0.79	0.80	0.92
	0	0	0	0	0	-1	3	4	5	5	5
MAA	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.96	0.88	0.73	0.80	0.82	0.91
	0	0	0	0	0	-1	3	4	5	5	5
CYA	0.99	1.00	1.00	0.98	0.99	0.96	0.89	0.77	0.84	0.78	0.91
	0	0	0	0	0	-1	3	4	5	5	5
MQA	0.99	0.99	0.98	1.00	0.99	0.94	0.86	0.73	0.83	0.83	0.93
	0	0	0	0	0	-1	4	5	5	5	5
CGO	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	0.94	0.87	0.74	0.82	0.83	0.93
	0	0	0	0	0	-1	4	5	5	5	5
CFA	0.95	0.96	0.96	0.94	0.94	1.00	0.88	0.75	0.79	0.80	0.89
	1	1	1	1	1	0	4	5	5	5	5
CRI	0.88	0.88	0.89	0.86	0.87	0.88	1.00	0.73	0.70	0.77	0.81
	-3	-3	-3	-4	-4	-4	0	1	1	1	1
MLO	0.74	0.73	0.77	0.73	0.74	0.75	0.73	1.00	0.77	0.67	0.75
	-4	-4	-4	-5	-5	-5	-1	0	0	0	0
ESP	0.79	0.80	0.84	0.83	0.82	0.79	0.70	0.77	1.00	0.83	0.83
	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-1	0	0	0	0
SIS	0.80	0.82	0.78	0.83	0.83	0.80	0.77	0.67	0.83	1.00	0.84
	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-1	0	0	0	0
ALT	0.92	0.91	0.91	0.93	0.93	0.89	0.81	0.75	0.83	0.84	1.00
	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-1	0	0	0	0

Таблица 3. Оценки коэффициентов корреляции рядов типа *B-А* для 11 пробоотборных станций сети CSIRO. В упорядоченной паре станций первая – в первом столбце таблицы, а вторая – в первой строке. Под оценкой указан оптимальный сдвиг во времени в месяцах

Ряды типа *В-А* для всех станций имеют годовую цикличность, их форма колебаний устойчива. Это особенно строго выражено в рядах станций Южного полушария - они синфазны (кроме случая тропической станции CFA, где "метановые события" наступают на 1 месяц раньше); их амплитуды практически одинаковы.

Для всех станций колебания в рядах типа *В-А* имеют выраженную сезонность – минимум в теплый период года, максимум – в холодный. Это иллюстрирует рис. 5а, где для станций ALT, CFA и SPO для каждого месяца календарного года приведены результаты осреднения по годам соответствующих элементов рядов типа *B-A*. На рис. 5б для станций ALT (полярная станция в Северном полушарии) и CFA (тропическая станция в Южном полушарии) применен циклический сдвиг<sup>4)</sup> против времени на 5 месяцев и по времени на 1 месяц соответственно. Кривые, соответствующие станциям Южного полушария – SPO и CFA – после сдвига оказались очень близки. Кривая, соответствующая станции ALT имеет практически тот же годовой ход, но несколько большую амплитуду.



Рисунок 5. Результаты осреднения рядов типа *B-A* по годам для станций SPO, CFA и ALT: а) без сдвигов по времени; б) для ряда станции CFA применен циклический сдвиг по времени на 1 месяц, а для станции ALT – на 5 месяцев против времени. В легенде к символам станций добавлено: YCO – годовой ход (yearly course) без сдвигов, либо YC – с оговоренными сдвигами во времени

<sup>4)</sup> «Циклический сдвиг» означает циклическую перестановку месяцев. Например, циклический сдвиг по времени на 1 месяц по времени выглядит так:  $1 \rightarrow 2, 2 \rightarrow 3, ..., 11 \rightarrow 12, 12 \rightarrow 1$ .

## Заключение

Проанализированы ряды современных месячных данных о фоновых концентрациях метана в приповерхностном слое с 11 станций сети CSIRO. Сеть имеет глобальный охват: самая высокоширотная станция Северного полушария – Alert (82.5° с.ш.), а самая южная в Южном полушарии – South Pole, Южный полюс.

Ряды данных исследовались в двух масштабах времени – годовом и сезонном. Для анализа в годовом масштабе времени для каждой станции сначала строился ряд скользящих средних за 12 месяцев – ряд типа *А*. Далее из него удалялись систематические отличия от такого ряда для станции Alert. При этом обнаружилось, что в этом временном масштабе многолетние тренды уровня метана на всех станциях сходны. Они особенно близки на станциях Южного полушария.

Для характеристики изменчивости уровня CH<sub>4</sub> в сезонном масштабе времени для каждой станции строился ряд *B* – ряд скользящих среднедвухмесячных значений – и разность этого ряда с рядом скользящих среднегодовых значений (т.е. средних за 12 месяцев), ряд типа *B-A*.

Изменения концентраций метана в сезонном масштабе времени также оказались сходны на всех станциях в течение всего периода наблюдений. Коэффициенты корреляции рядов высоки, особенно для станций Южного полушария. Для последних коэффициенты корреляции с рядом станции SPO составляют 0.95 и выше. Однако для получения высоких коэффициентов корреляции применяются специфические временные сдвиги, компенсирующие различия в сезонности.

Подъемы и понижения уровня метана достаточно синхронно возникают в каждом полушарии в целом, хотя по мере приближения к тропической зоне возможны и небольшие сдвиги (на 1 месяц). В умеренных и полярных широтах разных полушарий различия по времени – 5 месяцев.

Изменения концентраций в сезонном масштабе времени имеют выраженную годовую цикличность, устойчивую форму и сезонный характер: в холодный период года отклонения положительны, в теплый – отрицательны.

Устойчивость формы колебаний, их сезонность, позволяет предположить, что они, возможно, связаны с сезонными изменениями интенсивности стока метана из атмосферы. Поскольку речь идет о концентрациях в приповерхностном слое, то речь может идти о сезонных колебаниях уровня содержания гидроксила ОН – основного фактора стока метана в нижней атмосфере. Образование ОН в атмосфере усиливается при увеличении потока солнечного излучения в ультрафиолетовом диапазоне (Naik et al., 2013; Voulgarakis et al., 2013), что связано с сезонностью. Роль гидроксил-радикала в изменчивости концентраций метана сейчас интенсивно исследуется модельными средствами.

### Благодарности

Автор признателен Полу Краммелу и Рэю Лангенфельдсу (P.B. Krummel, R.L. Langenfelds, CSIRO) за предоставление информации о веб-ресурсах, где располагаются данные мониторинга концентраций парниковых газов, Э.Я. Раньковой (Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля; Институт географии РАН) за верификацию результатов вычислений, а также следующим проектам за поддержку, оказанную этой работе:

– (№ 0148-2018-0006, рег. № 01201352499) Программа Фундаментальных Научных Исследований государственных академий наук на 2013-2020 гг., раздел 9 "Науки о Земле", подраздел 135 "Физические и химические процессы в атмосфере, включая ионосферу и магнитосферу Земли, криосфере и на поверхности Земли, механизмы формирования и современные изменения климата, ландшафтов, оледенения и многолетнемерзлых грунтов";

– Исследование совместных изменений климатических норм и показателей изменчивости температуры в приповерхностном слое и их влияния на погодные экстремумы, воздействия и риски для экосистем и здоровья населения на территории России и соседних стран; Программа Президиума РАН №51 "Изменение климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования";

– проект 1.3.3.2. Исследовать влияние изменения климата на потоки CO<sub>2</sub> через лесные и тундровые экосистемы на территории России; Программа научно-исследовательских, технологических и других работ Росгидромета для государственных нужд в области гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды.

#### Список литературы

Дзюба А.В., Елисеев А.В., Мохов И.И. 2012. Оценка изменений скорости стока метана из атмосферы при потеплении климата. – Известия РАН. Физика атмосферы и океана, т. 48, № 3, с. 372–382.

Елисеев А. В. 2018. Глобальный цикл метана: обзор. – Фундаментальная и прикладная климатология, т. 1, с. 52 – 70. DOI: 10.21513/2410-8758-2018-1-52-70.

Кароль И.Л., Киселев А.А. 2004. Атмосферный метан и глобальный климат. – Природа, № 7, с. 47-52.

Семенов С.М., Гельвер Е.С. 2002. Изменение годового хода среднесуточной температуры воздуха на территории России в XX веке. – Доклады Академии наук. Геофизика, т. 386, № 3, с. 389-394.

Cicerone R.J., Oremland R.S. 1988. Biogeochemical aspects of atmospheric methane. – Glob. Biogeochem. Cycles, vol. 2, No 4, pp. 299-327.

Collins M., Knutti R., Arblaster J., Dufresne J.-L., Fichefet T., Friedlingstein P., Gao X., Gutowski W.J., Johns T., Krinner G., Shongwe M., Tebaldi C., Weaver A. J.,

Wehner M. 2013. Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Francey R.J., Steele L.P., Spencer D.A., Langenfelds R.L., Law R.M., Krummel P.B., Fraser P.J., Etheridge D.M., Derek N., Coram S.A., Cooper L.N., Allison C.E., L. Porter L., Baly S., 2003. The CSIRO (Australia) measurement of greenhouse gases in the global atmosphere. *R*eport of the 11<sup>th</sup> WMO/IAEA Meeting of Experts on Carbon Dioxide Concentration and Related Tracer Measurement Techniques, Tokyo, Japan, September 2001, S.Toru and S. Kazuto (editors), World Meteorological Organization Global Atmosphere Watch, pp. 97-111,

Meinshausen M., Raper S., Wigley T. 2011. Emulating coupled atmosphereocean and carbon cycle models with a simpler model, MAGICC6–Part 1: Model description and calibration. – Atmos. Chem. Phys., No. 11, pp. 1417–1456.

Myhre G., Shindell D., Bréon F.-M., Collins W., Fuglestvedt J., Huang J., Koch D., Lamarque J.-F., Lee D., Mendoza B., Nakajima T., Robock A., Stephens G., Takemura T., Zhang H. 2013. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Naik V., Voulgarakis A., Fiore A.M., Horowitz L.W., Lamarque J.-F., Lin M., Prather M.J., Young P.J., D. Bergmann D., Cameron-Smith P.J., I. Cionni I., W. J. Collins W.J., Dalsøren S.B., Doherty R., Eyring V., Faluvegi G., Folberth G.A., Josse B.17, Lee Y.H., MacKenzie I.A., Nagashima T., van Noije T. P. C., Plummer D.A., Righi M., Rumbold S.T., Skeie R., Shindell D.T., Stevenson D.S., Strode S., Sudo K., Szopa S., Zeng G. 2013. Reindustrial to present-day changes in tropospheric hydroxyl radical and methane lifetime from the Atmospheric Chemistry and Climate Model Intercomparison Project (ACCMIP). – Atmos. Chem. Phys., No. 3, pp. 5277–5298, – Available at: www.atmos-chem-phys.net/13/ 5277/2013/ doi:10.5194/acp-13-5277-2013.

Voulgarakis A., Naik V., Lamarque J.F., Shindell D.T., Young P., Prather M.J., Wild O., Field R., Sudo K., Szopa S., Zeng G. 2013 Analysis of present day and future OH and methane lifetime in the ACCMIP simulations. – Atmospheric Chemistry and Physics, vol. 13, pp. 2563–2587. doi: 10.5194/acp-13-2563-2013.

Статья поступила в редакцию: 08.06.2018 г.

После переработки: 28.06.2018 г.