

МЕТАН В ПРИПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ: СОВРЕМЕННОЕ СОДЕРЖАНИЕ, МНОГОЛЕТНИЕ ТРЕНДЫ И ВНУТРИГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ

В.В. Кузовкин¹⁾, С.М. Семенов^{1, 2, 3)}*

¹⁾ Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля,
Россия, 107258, Москва, ул. Глебовская, д. 20б;
*адрес для переписки: vladimir.kuzovkin@bk.ru

²⁾ Институт географии РАН,
Россия, 119017, Москва, Старомонетный пер., дом 29

³⁾ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
Россия, 101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20

Реферат. Статья посвящена эмпирическому анализу рядов среднемесячных концентраций метана в приповерхностном слое атмосферы с глобальной сети станций мониторинга. Они функционируют в рамках ГСА – Глобальной службы атмосферы (GAW – Global Atmosphere Watch) – под эгидой Всемирной метеорологической организации (ВМО). Данные находятся в свободном доступе в Мировом центре данных по парниковым газам ГСА/ВМО (World Data Centre for Greenhouse Gases GAW/WMO – WDCGG) на его интернет-ресурсе <https://gaw.kishou.go.jp/>. Временной охват – с 1980х годов. Рассмотрены ряды данных с 69 станций, из которых 22 станции представляют глобальный фон. Остальные станции – региональные. Исследовались многолетние тренды концентраций и внутригодовые (межмесячные) отклонения среднемесячных концентраций от многолетних трендов. Многолетний тренд оценивался с помощью ряда скользящих 12-месячных средних. Для исключения систематических различий в концентрациях метана эти ряды «приводились» к ряду для высокоширотной арктической станции Alert (82° 30' с.ш., 62° 21' з.д.). Анализ показал, что многолетние тренды нелинейны (в том числе с известной паузой в росте уровней метана в 1999-2006 гг.), но сходны на большинстве рассматриваемых станций. Исключения – 6 региональных станций, квалифицированные как «аномальные» по метану. Возможная причина аномальности – нахождение под влиянием определенных источников метана – антропогенных или же естественных. Многолетние тренды на остальных станциях незначительно отличаются от среднего тренда для глобальных станций. Ряды внутригодовых (межмесячных) отклонений среднемесячных концентраций от многолетних трендов для многих станций, даже расположенных на очень значительных расстояниях друг от друга, обнаруживают высокое корреляционное сходство. Однако оно проявляется при оптимальном временном сдвиге от 5 мес. в направлении более ранних дат до 6 мес. в направлении более поздних дат. Результаты анализа совместимы с предположением о том,

что внутригодовая изменчивость концентрации метана управляется в значительной мере сезонными факторами, существенно связанными с широтой, среди которых вертикальное перемешивание в атмосфере и разрушение в тропосфере в реакциях с гидроксидом. Среднеквадратические значения внутригодовых (межмесячных) колебаний концентрации метана заметно зависят от широты. Чем выше широта, тем, в целом, больше значение. Максимальные достигаются в широтном поясе 45-50° с.ш., а далее, к северу, значения убывают. Такой характер внутригодовых колебаний уровня содержания метана возможно объясняется в том числе существенными межсезонными колебаниями антропогенных выбросов метана в указанных широтах в странах с развитой экономикой, расположенных в Северной Америке и Западной Европе. Исследование корреляций рядов внутригодовых (межмесячных) колебаний среднемесячных концентраций CH_4 и CO_2 показало, что при оптимальных временных сдвигах они бывают значительными – около 0.8. Причем это наблюдается как на некоторых полярных станциях, так и на тропических. Это подтверждает предположение о том, что в формировании внутригодовых (межмесячных) отклонений содержания метана и диоксида углерода в приповерхностном слое от многолетних трендов значительную роль играют естественные сезонные биогеохимические и геофизические процессы – вертикальное перемешивание воздуха, поглощения CO_2 на земной поверхности, разрушения метана в тропосфере в реакциях с гидроксидом.

Ключевые слова. Атмосфера Земли, приповерхностный слой, метан, данные мониторинга, глобальный анализ, современные концентрации, многолетние тренды, внутригодовая изменчивость, пространственные закономерности, корреляционное сходство.

Введение

Парниковому эффекту на Земле мы обязаны, в основном, пяти газам: водяному пару H_2O , диоксиду углерода CO_2 , метану CH_4 , закиси азота N_2O и озону O_3 . Метан, составляя незначительную часть атмосферного воздуха (сейчас – около 2 ppm), оказывает мощное воздействие на климат Земли. При временном горизонте 100 лет для GWP (Global Warming Potential) в расчете на единицу выброса в атмосферу метан усиливает парниковый эффект примерно в 30 раз эффективнее, чем углекислый газ CO_2 (Myhre et al., 2013, p. 8SM-39). Около 50% глобальной годовой эмиссии метана с земной поверхности в атмосферу приходится на антропогенные источники (Kirschke et al., 2013), в том числе рисоводство, животноводство, горение биомассы.

Систематические измерения содержания парниковых газов в приповерхностном слое атмосферы начались во второй половине XX века – Ч.Д. Килинг с сотрудниками в 1958 г. начал измерять содержание CO_2 на станции мониторинга Мауна-Лоа (Семенов, 2018), что позволило впоследствии сделать ряд важных заключений (Keeling et al., 2005). С тех пор сеть станций мониторинга, где измеряется содержание парниковых газов в атмосфере, стала глобальной. На международном уровне эти станции функционируют в рамках

ГСА – Глобальной службы атмосферы (GAW – Global Atmosphere Watch) – под эгидой Всемирной метеорологической организации (ВМО). Они расположены на материках и островах в океане и характеризуют содержание парниковых газов в приповерхностном слое атмосферы.

Данные станционных наблюдений хранятся в Мировом центре данных по парниковым газам ГСА/ВМО (World Data Centre for Greenhouse Gases GAW/WMO – WDCGG). На его ресурсе <https://gaw.kishou.go.jp/> в том числе расположены данные об уровнях содержания CH_4 , анализу которых посвящена данная статья.

Цель данной работы – по данным глобальной сети станций мониторинга ГСА о содержании метана в приповерхностном слое атмосферы выполнить глобальный анализ современного содержания метана в приповерхностном слое, многолетних трендов и внутригодовой изменчивости.

Данные и методы

В данной работе анализируются 69 станционных рядов данных о среднем ежегодном содержании метана в приповерхностном слое атмосферы, представленных на ресурсе <https://gaw.kishou.go.jp/> (данные, находящиеся в открытом доступе, скачаны 23.03.2020). Исходные измерения были проведены различными коллективами исследователей в ходе измерений *in situ* или же последующего лабораторного анализа проб воздуха, отобранных в специальные емкости. Глобальное распределение станций показано на рис. 1. Часть этих станций – 22 станции – относятся к категории глобальных станций. Они представляют глобальное фоновое содержание метана, поскольку находятся вне прямого влияния определенных источников эмиссии CH_4 . Ряды остальных станций, региональных, характеризуют региональные уровни и тренды.

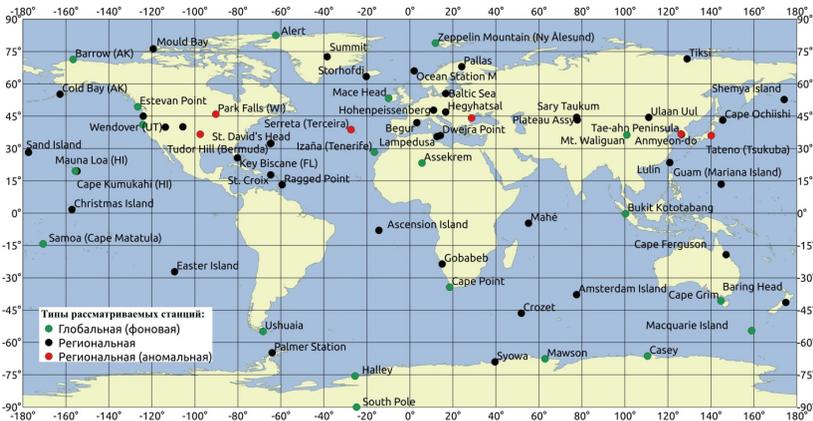


Рисунок 1. Глобальное распределение станций мониторинга уровня содержания парниковых газов, данные которых по метану использованы в данной работе; критерий аномальности региональных станций будет обсуждаться позже в этой статье

Figure 1. Global distribution of GHG monitoring stations the methane data of which are used in this work; the criterion for abnormality of regional stations will be discussed later in this article

В этой работе, с использованием описанных выше данных, проведен анализ современного содержания метана, многолетних трендов и внутригодовой

изменчивости содержания метана в приповерхностном слое атмосферы. Анализ производился в соответствие с методологией, предложенной в работе (Семенов, Кузовкин, 2019). При расчетах использовался язык программирования R, средства которого находятся в свободном доступе (The R Project for Statistical Computing, <https://www.r-project.org/>). Повторим кратко основные методические моменты.

Для оценки многолетних изменений содержания CH_4 для станции используется ее ряд скользящих 12-месячных средних значений $\{B(n)\}$, построенный по исходному ряду $\{A(n)\}$ среднемесячных концентраций метана на этой станции. Для данного месяца n 12-месячное среднее вычисляется, исходя из значения в n -й месяц, 6 предшествующих и 6 последующих месяцев. Вычисление производится, если все эти исходные данные в наличии. При вычислении среднего значения за первый и последний месяцы учитываются с коэффициентом 0.5, а остальные – с коэффициентом 1.

Для целей сравнения многолетних трендов на различных станциях использовались не непосредственно ряды $\{B(n)\}$, а их аналоги – ряды, «приведенные» к реперной станции Alert (82.5° с.ш.; 62.34° з.д.). Это необходимо по следующим причинам. В разных точках географического пространства имеются различия в уровне антропогенной эмиссии метана в атмосферу, скорости его химического стока и процессах переноса в тропосфере. Это обуславливает систематические различия в уровнях содержания метана, которые при оценке тренда целесообразно исключить. Для этого для каждой станции вычислялась средняя разность значений $B(n)$ на станции Алерт и на данной станции (конечно, за те месяцы за которые эти значения имеются для обеих станций). Затем эта поправка прибавлялась к каждому элементу ряда $\{B(n)\}$ для данной станции. Полученный таким образом ряд будет обозначаться $\{B^*(n)\}$. Вычисленная поправка впоследствии также использовалась для характеристики систематических различий в уровне содержания метана на станции Alert и других станциях.

Выбор в данном случае в качестве реперной станции именно станции Alert не имеет какого-либо специального значения. Эта высокоширотная станция, очевидно, представляет глобальный фон и имеет достаточно полный ряд данных наблюдений (они ведутся с 1985 года).

В природе на долговременные изменения содержания метана в атмосфере накладываются сезонные колебания. Ведь и его эмиссии (естественные и антропогенные) с земной поверхности в атмосферу, и процессы горизонтального переноса и вертикального перемешивания, и гибели в реакциях, в частности, с гидроксидом (Киселёв, Кароль, 2019) имеют сезонные составляющие. Поэтому, помимо анализа многолетних изменений важно произвести оценку сезонных колебаний содержания метана. В данной работе для этого используется ряд $\{C(n)\}$, который получается вычитанием из ряда $\{A(n)\}$ соответствующего ряда $\{B(n)\}$. Ряд $\{C(n)\}$ характеризует внутригодовые, сезонные колебания.

Ряды $\{C(n)\}$ для различных станций сравниваются по их среднеквадратическому значению (аналог амплитуды колебаний) и по «оптимальному»

сдвигу во времени. Так для упорядоченной пары рядов обозначается сдвиг во времени на k месяцев второго ряда относительно первого, т.е. переход к ряду $\{C(n + k)\}$, при котором корреляция рядов достигает максимума. При этом при поиске оптимума рассматриваются значения k от (-5) до 6. При $k > 0$ это будет называться сдвигом на k месяцев против времени (т.е. в направлении более ранних дат), а при $k < 0$ на $|k|$ месяцев по времени (т.е. в направлении более поздних дат). Такие оценки оптимального сдвига можно делать не только в отношении пары рядов содержания метана, но и для пары рядов для разных газов, например, для пары метан-углекислый газ.

Результаты и обсуждение

Многолетние тренды и абсолютные уровни содержания

Результаты расчета среднего для многолетних трендов, представленных рядами $\{B^*(n)\}$, для глобальных станций (GB, отражает глобальное фоновое изменение содержания метана) и региональных станций (RB, отражает среднее региональное изменение содержания метана) представлены на рис. 2. Можно заметить, что кривые RB и GB весьма близки (различия не превосходят 6 ppb), т.е. региональные станции в среднем указывают на тот же многолетний тренд содержания метана, что и глобальные. Сходство многолетних трендов содержания метана, возможно, объясняется относительно быстрым перемешиванием метана в нижней атмосфере по сравнению с временем жизни – время перемешивания составляет не более нескольких месяцев (Елисеев, 2018; Киселев, Кароль, 2019), а время жизни – около 10 лет (Voulgarakis et al., 2013; Елисеев, 2018).

Заметим, что этот тренд существенно нелинейный. В том числе хорошо заметна пауза в росте уровней метана в 1999-2006 гг., на что указывали многие авторы, см., например, (Dlugokencky et al., 2009).

На рис. 2 фоном даны также максимальные и минимальные индивидуальные отклонения для станций от среднего изменения – для глобальных станций от GB, а для региональных станций – от RB. Разность максимального и минимального значения индивидуального отклонения составляет для глобальных станций не более 12 ppb, а для региональных – в основном, не более 18 ppb, что примерно соответствует 1% современных значений содержания метана в приповерхностном слое атмосферы.

Однако для небольшого числа станций отклонения более значительны. Их 6: Seretta, Southern Great Plains, Park Falls, Constanta, Tateno, Tae-ann Peninsulla. Мы квалифицируем эти станции как «аномальные» по метану. Возможная причина аномальности - нахождение станции под влиянием определенных источников выбросов метана. На рис. 3 представлены средние многолетние изменения содержания CH_4 в ppb в приповерхностном слое атмосферы для группы региональных станций (RB, синий цвет) и индивидуальные изменения для «аномальных» региональных станций. На рисунке видно, что отклонения для таких станций от среднего весьма существенны. Эти станции мы исключаем из дальнейшего рассмотрения.

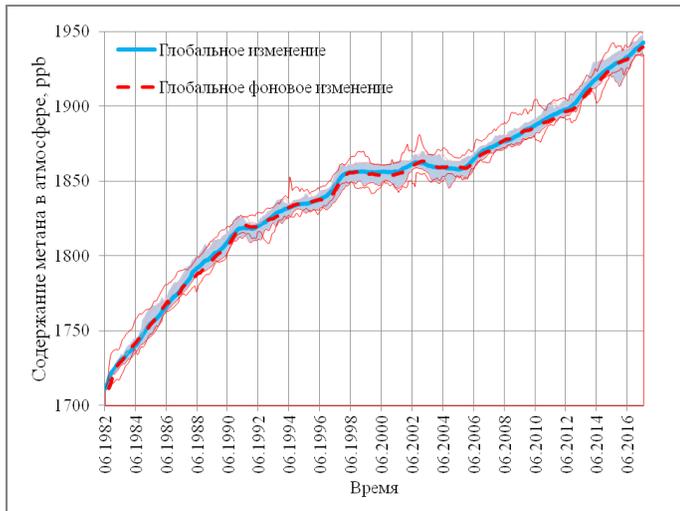


Рисунок 2. Средние многолетние изменения содержания CH_4 в приповерхностном слое атмосферы (ppb): красный цвет – для группы глобальных станций (GB), а синий цвет – для группы региональных станций (RB); разность максимального и минимального индивидуального отклонения для станций от среднего тренда по их группе показана розовым и голубым фоном соответственно

Figure 2. Average long-term changes in CH_4 content in the near-surface layer of the atmosphere (ppb): red for a group of global stations (GB), and blue for a group of regional stations (RB); the difference between maximum and minimum deviations for individual stations from the average change for respective group is shown in pink and blue, respectively

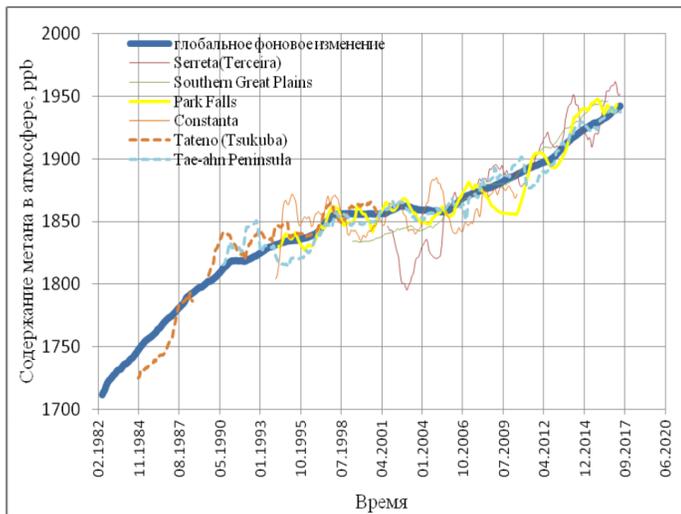


Рисунок 3. Средние многолетние изменения содержания CH_4 в приповерхностном слое атмосферы (ppb) для группы региональных станций (RB, синий цвет) и индивидуальные изменения для «аномальных» региональных станций

Figure 3. Average long-term changes in the content of CH_4 in the near-surface layer of the atmosphere (ppb) for a group of regional stations (RB, blue) and individual changes for 'abnormal' regional stations

Результаты расчета систематических различий содержания метана на рассматриваемых станциях и выделенной станции Alert показаны на рис. 4. На

рисунке видно, что на континентальных станциях в Северной Америке и Евразии, особенно, в регионах с развитым хозяйством, многолетние уровни содержания CH_4 в большинстве случаев заметно превышают значения на станции Alert. В Южном полушарии многолетние уровни содержания CH_4 меньше, чем на станции Alert. С убыванием широты отличия становятся все заметнее. Во внетропической зоне они доходят до 152 ppb, что составляет примерно 8-9% от среднего уровня метана за весь многолетний период наблюдений.

Возможные причины такой зависимости множественны. Это, в первую очередь, наличие больших источников антропогенных выбросов метана в Северном полушарии, чем в Южном, что связано с общим более высоким уровнем развития хозяйства. Это справедливо, однако, и в отношении естественных выбросов. В Южном полушарии океан занимает большую часть земной поверхности, чем в Северном полушарии, а океанические выбросы метана невелики по сравнению с наземными (Ciais et al., 2013; Kirschke et al., 2013), среди источников которых есть, например, мощные болотные комплексы.

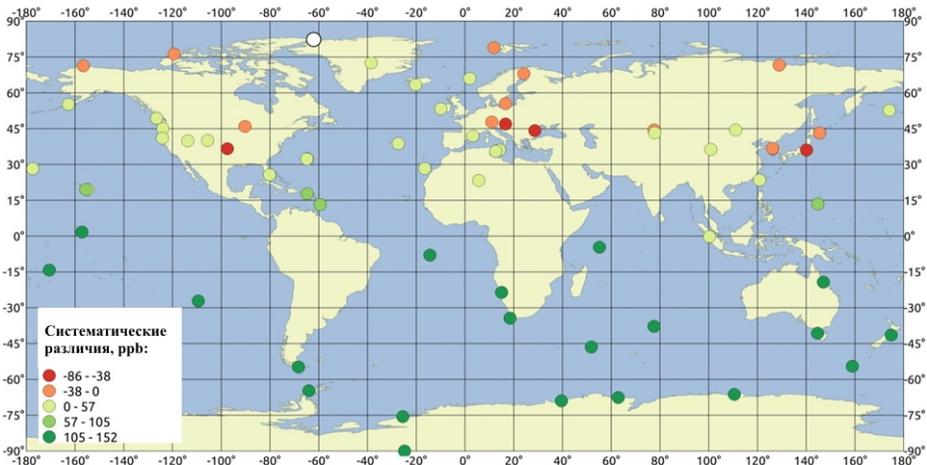


Рисунок 4. Систематические различия в многолетних уровнях содержания метана на станции Alert и других станциях

Figure 4. Systematic differences in long-term methane levels at Alert and other stations

Внутригодовая изменчивость

Внутригодовые (межмесячные) колебания содержания метана на станции представлены рядом $\{C(n)\}$, $C(n) = A(n) - B(n)$. Были рассчитаны:

- среднее квадратическое значение $\{C(n)\}$ в относительных единицах, а именно, по отношению к этой величине для станции Alert;
- оптимальный сдвиг по времени относительно станции Alert (см. выше – раздел «Данные и методы»).

Результаты представлены на рис. 5 и 6.

Как видно из рис. 5, среднее квадратические отклонения заметно зависят от широты. Чем выше широта, тем, в целом, больше значение. Максимальные достигаются в широтном поясе 45-50° с.ш., а далее, к северу, значения убы-

вают. Аналогичная зависимость была получена ранее для углекислого газа (Семенов, Кузовкин, 2019). Такой характер внутригодовых колебаний уровня содержания метана возможно объясняется в том числе существенными межсезонными колебаниями антропогенных выбросов метана в указанных широтах в странах с развитой экономикой, расположенных в Северной Америке и Западной Европе.

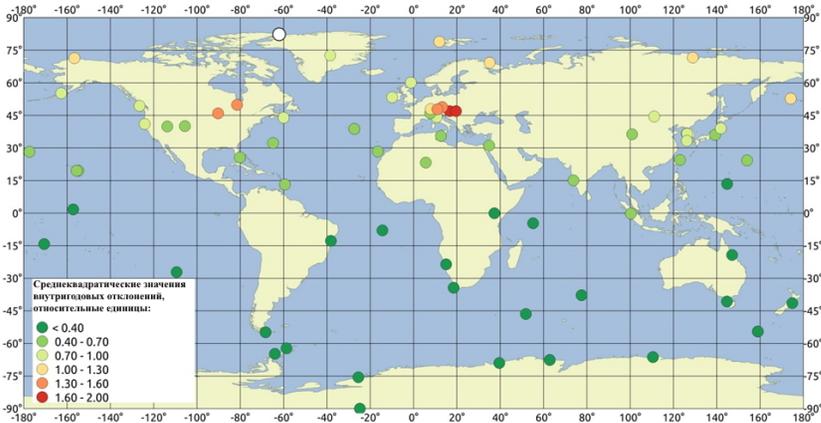


Рисунок 5. Среднеквадратическое значение внутригодовых отклонений содержания CH_4 от многолетнего тренда на различных станциях; за единицу принято среднеквадратическое значение для станции Alert (обозначена белым кругом)

Figure 5. Root-mean-square value of intra-annual deviations of CH_4 content from the long-term trend at different stations; the unit is taken as the root-mean-square-value for the Alert station (indicated by a white circle)

Результаты расчета оптимального временного сдвига для различных станций по отношению к реперной станции Alert представлены на рис. 6. Как видно из рисунка, на большинстве Северного полушария внутригодовые колебания синфазны – временной сдвиг по отношению к станции Alert равен 0. Однако для ряда станций умеренной зоны ($30\text{--}60^\circ$ с.ш.) значения оптимального сдвига отрицательны, т.е. «метановые события» наступают раньше, чем на станции Alert. Это, возможно, объясняется значительной антропогенной компонентой выбросов метана в этом широтном поясе, сезонное распределение которой существенно не совпадает с сезонным распределением естественной компоненты. Оптимальный сдвиг во времени в Южном полушарии положителен и в целом возрастает с убыванием широты. Это совместимо с представлением о том, что внутригодовые колебания уровня содержания метана на станциях Южного полушария в основном определяются процессами вертикального перемешивания и разрушения метана в реакциях с гидроксидом, сезонность которых в значительной мере определяется широтой.

Для CH_4 , как и для CO_2 (Семенов, Кузовкин, 2019), ряды $\{C(n)\}$, характеризующие внутригодовые (межмесячные) отклонения среднемесячных уровней содержания метана от многолетнего тренда, могут демонстрировать высокие корреляции с учетом оптимального временного сдвига. Для иллю-

страции этого на рис. 7 приведены такие ряды для трех станций: Alert, Guam и Easter Island. Эти станции расположены на значительном расстоянии друг от друга. Alert – арктическая станция (82.50° с.ш., 62.35° з.д., 210 м н.у.м). Guam – станция, находящаяся в тропической зоне Северного полушария в районе Филиппинских островов (13.43° с.ш., 144.77° в.д., 2 м н.у.м). Easter Island – тихоокеанская станция в Южном полушарии, находящаяся на полпути между Чили и Таити (27.17° ю.ш., 109.42° з.д., 41 м н.у.м.). Тем не менее, с учетом оптимального временного сдвига (-5) для станции Easter Island, ряды $\{C(n)\}$ этих станций демонстрируют сходный характер изменений во времени, и корреляции достаточно высоки: 0.86 (Alert и Guam) и 0.93 (Alert и Easter Island).

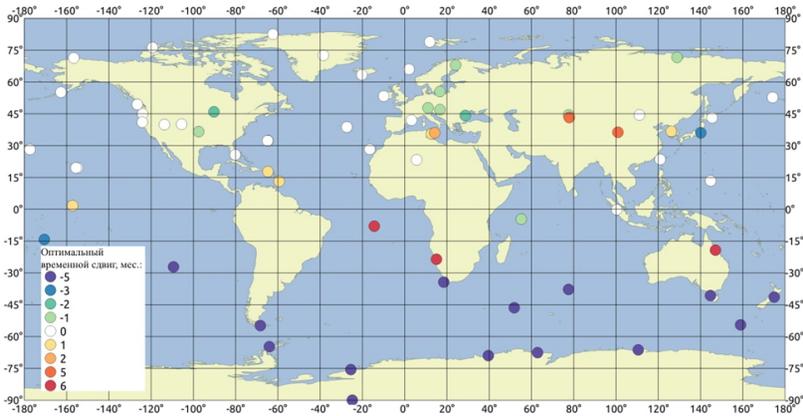


Рисунок 6. Оптимальный временной сдвиг (мес.) рядов внутригодовых (межмесячных) отклонений содержания метана от многолетнего тренда для разных станций по отношению к станции Alert

Figure 6. The optimal time shift (months) of the series of intra-annual (inter-monthly) deviations of methane content from the long-term trend for different stations in relation to the Alert station

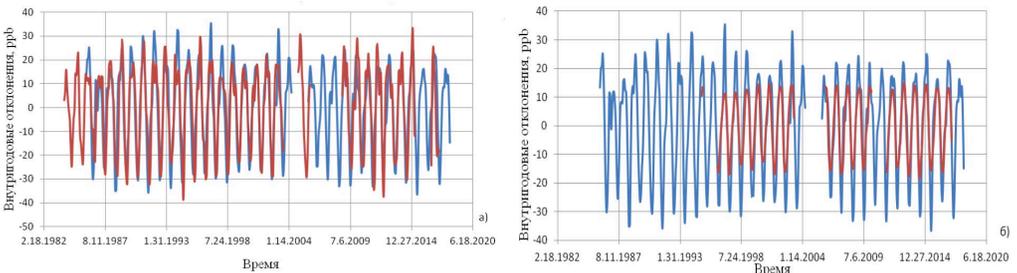


Рисунок 7. Ряды $\{C(n)\}$ внутригодовых (межмесячных) отклонений концентрации метана (ppb) от многолетнего тренда для станций а) Alert и Guam и б) Alert и Easter Island; к ряду для станции Easter Island применен сдвиг по времени на 5 мес. в направлении более поздних дат

Figure 7. Series $\{C(n)\}$ of intra-annual (inter-monthly) deviations of methane concentration (ppb) from the multiyear trend for stations a) Alert and Guam and b) Alert and Easter Island; a 5-month time shift towards the later dates was applied to the series for Easter Island

Теоретически в формировании внутригодовых изменений уровней содержания метана и углекислого газа значительную роль играет сезонный фактор, связанный с потоком солнечного излучения. Его сезонное усиление стимулирует как вертикальное перемешивание в атмосфере, способствующее убыли содержания этих газов в приповерхностном слое, так и изъятие CO_2 из атмосферы в ходе фотосинтеза растениями и разрушение CH_4 в реакциях с гидроксидом. Вследствие этого в рядах $\{C(n)\}$ для эти газов можно ожидать некоторое сходство. На рис. 8 представлен оптимальный временной сдвиг рядов внутригодовых (межмесячных) отклонений содержания метана от многолетнего тренда для CH_4 по отношению к CO_2 .

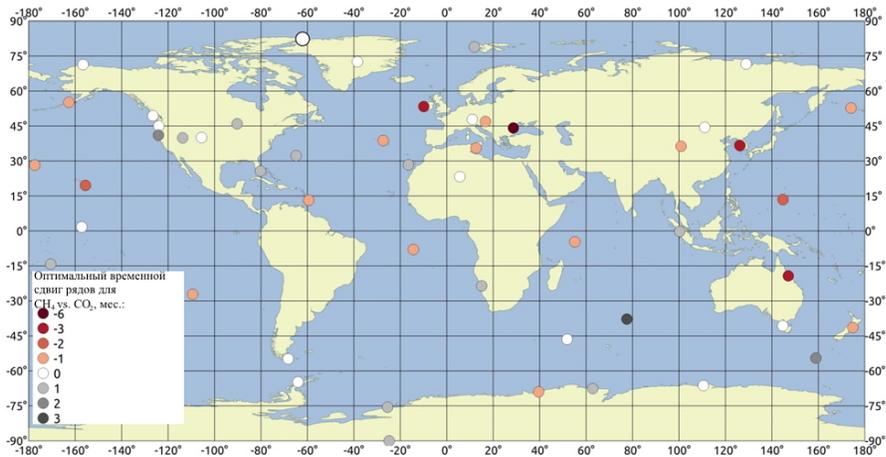


Рисунок 8. Оптимальный временной сдвиг рядов внутригодовых (межмесячных) отклонений содержания от многолетнего тренда для CH_4 по отношению к соответствующим рядам для CO_2

Figure 8. The optimal time shift of the series of intra-annual (inter-monthly) deviations of content from the long-term trend for CH_4 in relation to respective series for CO_2

Как видно на рис. 8, оптимальный временной сдвиг между рядами, представляющими внутригодовые колебания уровней содержания метана по отношению к соответствующим рядам для углекислого газа, на большинстве станций составляет по модулю не больше месяца. Места, где это правило нарушается – сосредоточения промышленности и энергетики.

В табл. 1 для различных станций представлены значения корреляций рядов $\{C(n)\}$ внутригодовых (межмесячных) отклонений содержания метана от многолетнего тренда для CH_4 и соответствующих рядов для CO_2 при оптимальных сдвигах метанового ряда от ряда для CO_2 .

Как видно из табл. 1, корреляции рядов $\{C(n)\}$ для CH_4 и CO_2 при оптимальных временных сдвигах действительно бывают значительными – около 0.8. Причем это наблюдается как на полярных станциях (например, Casey, Alert), так и на тропических станциях (например, Guam). Это подтверждает предположение о том, что в формировании внутригодовых (межмесячных) отклонений содержания метана и диоксида углерода в приповерхностном слое от многолетних трендов значительную роль играют естественные сезон-

ные биогеохимические и геофизические факторы. Они связаны с процессами вертикального перемешивания газов, поглощения CO_2 на земной поверхности, разрушения метана в тропосфере в реакциях с гидроксилом.

Таблица 1. Корреляции рядов $\{C(n)\}$ для CH_4 и CO_2 при оптимальных временных сдвигах метанового ряда относительно ряда для CO_2

Table 1. Correlations of the series $\{C(n)\}$ for CH_4 and CO_2 at optimal time shifts of the methane series relative to respective series for CO_2

Название станции	Временной сдвиг	Коэффициент корреляции	Широта	Долгота
Alert	0	0.77	82.50	-62.34
Zeppelin Mountain (Ny Ålesund)	0	0.72	78.91	11.89
Summit	0	0.73	72.58	-38.48
Tiksi	0	0.64	71.59	128.92
Barrow (AK)	0	0.72	71.32	-156.61
Cold Bay (AK)	-1	0.47	55.20	-162.72
Mace Head	0	0.51	53.33	-9.90
Shemya Island	-1	0.59	52.72	174.10
Estevan Point	-1	0.50	49.38	-126.54
Hohenpeissenberg	0	0.53	47.80	11.01
Hegyhatsal	0	0.82	46.95	16.65
Park Falls (WI)	-1	0.48	45.93	-90.27
Ulaan Uul	0	0.78	44.44	111.09
Constanta (Black Sea)	0	0.30	44.17	28.68
Trinidad Head (CA)	1	0.46	41.05	-124.15
Niwot Ridge - T-van (CO)	-1	0.68	40.05	-105.59
Wendover (UT)	0	0.70	39.90	-113.72
Serreta (Terceira)	-1	0.49	38.77	-27.38
Tae-ahn Peninsula	2	0.12	36.73	126.13
Anmyeon-do	-1	0.72	36.54	126.33
Mt, Waliguan	6	0.43	36.29	100.90
Lampedusa	1	0.74	35.52	12.63
Tudor Hill (Bermuda)	-1	0.69	32.27	-64.88
Izaña (Tenerife)	-1	0.68	28.31	-16.50
Sand Island	-1	0.72	28.22	-177.37
Key Biscane (FL)	-1	0.73	25.67	-80.20
Assekrem	-1	0.71	23.27	5.63
Mauna Loa (HI)	-3	0.70	19.54	-155.58
Guam (Mariana Island)	-2	0.84	13.43	144.78
Ragged Point	-1	0.83	13.17	-59.43
Christmas Island	-1	0.61	1.70	-157.17
Bukit Kototabang	0	0.37	-0.20	100.32
Mahé	3	0.40	-4.67	55.17
Ascension Island	0	0.65	-7.97	-14.40
Samoa (Cape Matatula)	-3	0.14	-14.25	-170.56
Cape Ferguson	-2	0.40	-19.28	147.06
Gobabeb	0	0.57	-23.57	15.03
Easter Island	-3	0.32	-27.17	-109.42

Cape Point	1	0.68	-34.35	18.49
Amsterdam Island	0	0.67	-37.80	77.54
Cape Grim	1	0.72	-40.68	144.69
Baring Head	1	0.46	-41.41	174.87
Crozet	1	0.75	-46.43	51.83
Macquarie Island	1	0.73	-54.50	158.94
Ushuaia	2	0.79	-54.85	-68.31
Palmer Station	1	0.80	-64.77	-64.05
Casey	1	0.82	-66.28	110.52
Mawson	1	0.76	-67.60	62.87
Syowa	1	0.75	-69.01	39.58
Halley	1	0.73	-75.57	-25.50
South Pole	0	0.78	-90.00	-24.80

Заключение

Проведенный в данной работе эмпирический анализ данных изменений показал, что многолетний тренд уровня содержания метана в приповерхностном слое атмосферы Земли в последние десятилетия сходен в различных точках географического пространства. Он не линейен. Проявление стабилизации уровней содержания метана в 1999-2006 гг. имело глобальный характер. Их внутригодовая изменчивость имеет значительное корреляционное сходство, которое проявляется после применения временных сдвигов в целом отражающих различия календарных сезонов на различных широтах. Наибольшие абсолютные уровни содержания метана и амплитуды его внутригодовых колебаний географически приурочены к наиболее хозяйственно развитым регионам.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке со стороны следующих программ и проектов:

Темы НИР по Плану Фундаментальных научных исследований государственных академий наук № 0148-2019-0009, АААА-А19-119022190173-2 «Изменения климата и их последствия для окружающей среды и жизнедеятельности населения на территории России» (анализ концепции риска);

Тема 3.1. «Развитие методов и технологий климатического обслуживания, включая совершенствование моделей прогнозирования климата, методов оценки последствий изменения климата, климатического обоснования национальных адаптационных планов и мониторинга эффективности адаптаций» Плана НИТР Росгидромета на 2020 г., утвержденного приказом № 745 от 31.12.2019.

Список литературы

Елисеев А.В. 2018. Глобальный цикл метана. – Фундаментальная и прикладная климатология, т. 1, с. 52-70.

Киселев А.А., Кароль И. Л. 2019. С метаном по жизни. – Санкт-Петербург, Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова, 73 с. ISBN 978-5-9500883-7-7 I.

Семенов С.М. 2018. 60 лет глобальному фоновому мониторингу уровня CO₂ в атмосфере. – Фундаментальная и прикладная климатология, т. 1, с. 5-9. Doi: 10.21513/2410-8758-2018-1-05-09.

Семенов С.М., Кузовкин В.В. 2019. Современное содержание диоксида углерода в приповерхностном слое атмосферы Земли: многолетние тренды и внутригодовая изменчивость. – Фундаментальная и прикладная климатология, т. 4, с. 101-119. Doi 10.21513/0207-2564-2019-4-101-119.

Ciais P., Sabine C., Bala G., Bopp L., Brovkin V., Canadell J., Chhabra A., DeFries R., Galloway J., Heimann M., Jones C., Le Quéré C., Myneni R. B., Piao S., Thornton P. 2013. Carbon and Other Biogeochemical Cycles. – 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.

Dlugokencky E.J., Bruhwiler I., White J.W.C., Emmons L.K., Novelli P.C., Montzka S.A., Masarie K.A., Lang P.M., Crotwell A.M., Miller J.B., Gatti L.V. 2009. Observational constraints on recent increases in the atmospheric CH₄ burden. – Geophysical Research Letters, vol. 36, 118803. Doi:10.1029/2009gl039780.

IPCC, 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change /Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.). – Geneva, Switzerland, 151 p.

Keeling C.D., Piper S.C., Bacatow R. B., Wahlen M., Whorf T.P., Heimann P.M., Meijer H.A. 2005. Atmospheric CO₂ and ¹³CO₂ exchange with the terrestrial biosphere and oceans from 1978 to 2000: observations and carbon cycle implications. – In: "A History of Atmospheric CO₂ and its effects on Plants, Animals, and Ecosystems" /editors Ehleringer J.R., T.E. Cerling, M.D. Dearing. – Springer Verlag, New York, pp. 83-113.

Kirschke S., Bousquet P., Ciais P., Saunio 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 Quéré 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. 2013. Three decades of global methane sources and sinks. – Nature Geoscience, vol. 6, No. 10, pp. 813-823. Doi: 10.1038/ngeo1955. Available at: <http://www.nature.com/ngeo/journal/vaop/ncurrent/full/ngeo1955.html>.

Myhre G., Shindell D., Bréon F.-M., Collins W., Fuglestedt J., Huang J., Koch D., Lamarque J.-F., Lee D., Mendoza B., Nakajima T., A. Robock A., Stephens G., Takemura T., Zhang H. 2013. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. Supplementary Material. 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.). – Available at: www.climatechange2013.org and www.ipcc.ch.

The R Project for Statistical Computing – Available at: <https://www.r-project.org/> (accessed 08.03.2020)

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.

World Data Centre for Greenhouse Gases GAW/WMO – Available at: <https://gaw.kishou.go.jp/> (accessed 08.03.2020).

Статья поступила в редакцию: 07.08.2020 г.

После переработки: 15.10.2020 г.

METHANE IN THE SURFACE LAYER OF THE ATMOSPHERE: CURRENT CONTENT, LONG-TERM TRENDS AND INTRA- ANNUAL VARIABILITY

*V.V. Kuzovkin*¹⁾*, *S.M. Semenov*^{1, 2, 3)}

¹⁾ Yu.A. Israel Institute of Global Climate and Ecology,
20B, Glebovskaya str., 107258, Moscow, Russian Federation
* Correspondence address: *Vladimir.Kuzovkin@bk.ru*

²⁾ Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences,
29, Staromonetny per., 29, 119017, Moscow, Russian Federation

³⁾ National Research University 'Higher School of Economics',
Myasnitskaya str., 20, 101000, Moscow, Russian Federation

Abstract. The article is devoted to the empirical analysis of series of monthly mean concentrations of methane in the near-surface layer of the atmosphere from the global network of monitoring stations. They operate within the Global Atmosphere Watch (GAW) under the auspices of the World Meteorological Organization (WMO). The data is freely available at the World Data Center for Greenhouse Gases GAW/WMO (WDCGG) on its website <https://gaw.kishou.go.jp/>. The temporal coverage is from the 1980s. Data series from 69 stations are considered, of which 22 stations represent the global background conditions. The rest of the stations are regional. Long-term trends in concentrations and intra-annual (inter-monthly) deviations of mean monthly concentrations from long-term trends were studied. The multi-year trend was estimated using a series of 12-month running averages. To exclude systematic differences in methane concentrations, these series were adjusted to the series for the high-latitude Arctic station Alert (82° 30' N, 62° 21' W). The analysis showed that long-term trends are non-linear (including with a known pause in the growth of methane levels in 1999-2006), but are similar at most of the stations under consideration. Exceptions are 6 regional stations classified as 'abnormal' for methane. A possible cause of the abnormality is being under the influence of certain sources of methane (anthropogenic or natural). Long-term trends at the rest of the stations are just slightly differ from the average trend for global stations. The series of intra-annual (inter-monthly) deviations of mean monthly concentrations from long-term trends for many stations, even those located at very significant distances from each other, show high correlative similarity. However, it manifests itself at an optimal time shift from 5 months. towards earlier dates up to 6 months. towards later dates. The results of the analysis are consistent with the assumption that the intra-annual variability in methane concentration is largely driven by seasonal factors that are significantly related to latitude, including vertical mixing in the atmosphere and destruction in the troposphere in reactions with hydroxyl. The root-mean-square values of the intra-annual (inter-monthly) fluctuations in methane concentration significantly depend on latitude. The higher the latitude, the greater the overall value. Maximum values are reached in the latitudinal belt 45-50° N, and further, to the north, the

values decrease. This character of intra-annual fluctuations in the level of methane content may be explained, among other things, by significant inter-seasonal fluctuations in anthropogenic methane emissions at the indicated latitudes in countries with developed economies located in North America and Western Europe. The estimates of correlations of the series of intra-annual (inter-monthly) fluctuations of the average monthly concentrations of CH₄ and CO₂ showed that at optimal time shifts, they are rather high, about 0.8. Moreover, this is observed both at some polar stations and at tropical ones. This confirms the assumption that natural seasonal biogeochemical and geophysical processes play a significant role in the formation of intra-annual (inter-monthly) deviations of the methane and carbon dioxide content in the near-surface layer from long-term trends, namely, vertical mixing of air, CO₂ absorption on the Earth's surface, destruction of methane in the troposphere in reactions with hydroxyl.

Keywords. Earth's atmosphere, near-surface layer, methane, monitoring data, global analysis, current concentrations, long-term trends, intra-annual variability, spatial patterns, correlative similarity.

References

Eliseev A.V. 2018. Global'nyy tsikl metana [The global methane cycle]. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya – Fundamental and Applied Climatology*, vol. 1, pp. 52-70.

Kiselev A.A., Karol I.L. 2019. *S metanom po zhizni* [With methane in life]. St. Petersburg, Main Geophysical Observatory named after A.I. Voeikova, 73 p. ISBN 978-5-9500883-7-7 I.

Semenov S.M. 2018. 60 let global'nomu fonovomu monitoringu urovnya CO₂ v atmosfere [60 years of global background monitoring of CO₂ levels in the atmosphere]. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya – Fundamental and Applied Climatology*, vol. 1, pp. 5-9. Doi: 10.21513 / 2410-8758-2018-1-05-09.

Semenov S.M., Kuzovkin V.V. 2019. Sovremennoye sodержaniye dioksida ugleroda v pripoverkhnostnom sloye atmosfery Zemli: mnogoletniye trendy i vnutrigodovaya izmenchivost' [Modern content of carbon dioxide in the near-surface layer of the Earth's atmosphere: long-term trends and intra-annual variability]. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya – Fundamental and Applied Climatology*, vol. 4, pp. 101-119. Doi 10.21513 / 0207-2564-2019-4-101-119.

Ciais P., Sabine C., Bala G., Bopp L., Brovkin V., Canadell J., Chhabra A., DeFries R., Galloway J., Heimann M., Jones C., Le Quéré C., Myneni R. B., Piao S., Thornton P. 2013. Carbon and Other Biogeochemical Cycles. – 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.

Dlugokencky E.J., Bruhwiler I., White J.W.C., Emmons L.K., Novelli P.C., Montzka S.A., Masarie K.A., Lang P.M., Crotwell A.M., Miller J.B., Gatti L.V. 2009. Observational constraints on recent increases in the atmospheric CH₄ burden. – *Geophysical Research Letters*, vol. 36, 118803. Doi:10.1029/2009gl039780.

IPCC, 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change /Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)*. – Geneva, Switzerland, 151 p.

Keeling C.D., Piper S.C., Bacatow R. B., Wahlen M., Whorf T.P., Heimann P.M., Meijer H.A. 2005. Atmospheric CO₂ and ¹³CO₂ exchange with the terrestrial biosphere and oceans from 1978 to 2000: observations and carbon cycle implications. – In: "A History of Atmospheric CO₂ and its effects on Plants, Animals, and Ecosystems" /editors Ehleringer J.R., T.E. Cerling, M.D. Dearing. – Springer Verlag, New York, pp. 83-113.

Kirschke S., Bousquet P., Ciais P., Saunois 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 Quééré 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. 2013. Three decades of global methane sources and sinks. – *Nature Geoscience*, vol. 6, No. 10, pp. 813-823. Doi: 10.1038/ngeo1955. Available at: <http://www.nature.com/ngeo/journal/vaop/ncurrent/full/ngeo1955.html>.

Myhre G., Shindell D., Bréon F.-M., Collins W., Fuglestedt J., Huang J., Koch D., Lamarque J.-F., Lee D., Mendoza B., Nakajima T., A. Robock A., Stephens G., Takemura T., Zhang H. 2013. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. Supplementary Material. 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.)*. – Available at: www.climatechange2013.org and www.ipcc.ch.

The R Project for Statistical Computing – Available at: <https://www.r-project.org/> (accessed 08.03.2020)

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.

World Data Centre for Greenhouse Gases GAW/WMO – Available at: <https://gaw.kishou.go.jp/> (accessed 08.03.2020).