ОСОБЕННОСТИ МНОГОЛЕТНИХ ИЗМЕНЕНИЙ И СЕЗОННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ФОНОВЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ СО₂, CH₄ И N₂O НА СТАНЦИЯХ ГЛОБАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА

С.М. Семенов^{1,2)}, Э.Я. Ранькова^{1,2)}

¹⁾ Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля, Россия, 107258, Москва, ул. Глебовская, 20Б; SergeySemenov1@yandex.ru

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

Реферат. Использованы месячные данные о содержании углекислого газа $\mathrm{CO}_2,$ метана CH_4 и закиси азота $\mathrm{N}_2\mathrm{O}$ на 11 станциях сети CSIRO GASLAB Flask Sampling Network. Это станции глобального мониторинга фоновых концентраций в приповерхностном слое атмосферы. Многолетние изменения изучались с помощью рядов 12-тимесячных скользящих средних значений. Сезонная изменчивость исследовалась по разности рядов двухмесячных и 12-тимесячных скользящих средних значений. Обнаружено высокое сходство многолетних трендов на разных станциях для каждого из газов. Ряды сезонных девиаций на станциях, расположенных на разных внетропических широтах, с учетом соответствующих сезонных сдвигов также обнаружили высокое корреляционное сходство для CO₂ и CH₄, но не для N₂O. Результаты позволяют предположить, что ведущим фактором сезонной изменчивости CO2 и CH4 являются сезонные вариации потока солнечной радиации в нижней атмосфере. В сезон усиления потока и стимулируется поглощение СО2 наземными и океанскими растениями в ходе фотосинтеза, и увеличивается уровень содержания гидроксила в атмосфере, что ускоряет процесс разрушения метана в тропосфере.

Ключевые слова. Углекислый газ, метан, закись азота, станции глобального мониторинга, сходство, многолетние изменения, сезонные вариации.

THE FEATURES OF MULTIYEAR CHANGES AND SEASONAL VARIABILITY OF PRESENT-DAY BACKGROUND CONCENTRATIONS OF CO₂, CH₄ AND N₂O AT THE GLOBAL MONITORING STATIONS

S.M. Semenov^{1,2}, E.Ya. Ran'kova^{1,2}

¹⁾Yu.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology,
20B, Glebovskaya str., 107258, Moscow, Russia; SergeySemenov1@yandex.ru

²⁾Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, 29, Staromonetny lane, 119017, Moscow, Russia

Abstract. Monthly data on concentrations of carbon dioxide CO_2 , methane CH_4 and nitrous oxide N_2O from 11 stations of the CSIRO GASLAB Flask Sampling

Network are used. The stations monitor background concentrations in the surface layer of the atmosphere. Multiyear variability is studied with the time series of 12-months running averages. Seasonal variability is examined using differences of series of bimestrial running averages and 12-months running averages. Close similarity of the long-term trends has been found for each gas. The time series of seasonal deviations from stations situated at different extratropical latitudes, after adjustment for respective seasonal shifts, also reveal strong correlation for CH₄ and CO₂, but not for N₂O. The results support the hypothesis that seasonal variations of solar radiation flux in the lower atmosphere is the leading factor of seasonal variability of CH₄ and CO₂ photosynthetic uptake by terrestrial and ocean plants. Simultaneously, the level of hydroxyl in the atmosphere increases, that leads to intensification of methane depletion in the troposphere.

Keywords. Carbon dioxide, methane, nitrous oxide, global monitoring stations, similarity, long-term changes, seasonal variations.

Введение

Углекислый газ CO₂, метан CH₄ и закись азота N₂O считаются основными парниковыми газами среди тех, которые поступают в атмосферу вследствие деятельности человека. Обогащение ими атмосферы вызывает обеспокоенность в мире в связи с последующим усилением парникового эффекта. В 2011 г., по отношению к доиндустриальному времени¹, их радиационное воздействие наибольшее – оно составило соответственно 1.82 ± 0.19 , 0.48 ± 0.05 и 0.17 ± 0.03 Вт м⁻²; суммарное радиационное воздействие всех хорошо переменанных парниковых газов составило 2.83 (от 2.54 до 3.12) Вт м⁻² (Myhre et al., 2013, р. 676). Поэтому современные изменения глобальных уровней содержания этих газов в атмосфере являются предметом непрерывного мониторинга и последующих исследований.

CO₂, CH₄ и N₂O – хорошо перемешанные газы (well-mixed gases). Это означает, что время их жизни в атмосфере до безвозвратного или же возвратного выведения из атмосферы существенно больше, чем время распространения и перемешивания в тропосфере (в горизонтальном и вертикальном направлениях). Следствие – <u>примерное</u> выравнивание концентраций (<u>в объемном отношении смеси</u>, англ. – volume mixing ratio) в различных точках географического пространства, не находящихся под непосредственным влиянием конкретных крупных локальных или региональных источников эмиссии. Однако то, что приповерхностные концентрации близки, не означает, что они одинаковы и/или постоянны.

Многолетние изменения и сезонная изменчивость уровня содержания CH₄ в приповерхностном слое атмосферы были подробно рассмотрены в предыдущей публикации (Семенов, 2018). В этой работе будут приведены лишь новые оценки средних многолетних сезонных девиаций уровней метана. В

¹⁾ «Доиндустриальный период» – условно до 1750 г.

отношении двух других газов - CO_2 и N_2O - целью данной работы является изучение, исходя из данных мониторинга сети пробоотборных станций Научной и промышленной исследовательской организации Содружества наций (The Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, CSIRO), следующих вопросов:

 – многолетние и сезонные изменения глобальных фоновых уровней содержания этих газов в приповерхностном слое атмосферы;

 – сходство и различие этих изменений на различных широтах Северного и Южного полушарий;

 особенности этих изменений и их возможная связь с факторами формирования уровней содержания этих газов.

Данные и методы

Использовались данные мониторинга глобальных фоновых концентраций CO₂, CH₄ и N₂O с 11 пробоотборных станций сети CSIRO (CSIRO GASLAB Flask Sampling Network, см. http://cdiac.ess-dive.lbl.gov/trends/co2/csiro/). Расположение станций приведено на рис. 1, а полные названия – в табл. 1.



Рисунок 1. Сеть пробоотборных станций CSIRO CSIRO GASLAB Flask Sampling Network, http://cdiac.ess-dive.lbl.gov/trends/co2/csiro/

На этой сети пробоотборных станций в течение нескольких последних десятилетий ведутся измерения уровней CO₂, CH₄ и N₂O. В работе участвовали D.M. Etheridge, P.B. Krummel, R.L. Langenfelds, L.P. Steele и другие ведущие специалисты CSIRO. В данной статье использованы временные ряды среднемесячных концентраций из архива <CSIRO_gaslab data_Jul2015.zip> с ресурса http://cdiac.ess-dive.lbl.gov/trends/co2/modern_co2.html (\rightarrow DATA, \rightarrow CSIRO). Данные были скачаны в марте 2018 г.

Более подробная характеристика географического расположения этих станций и метод исследования временных рядов данных наблюдений, который применялся в этой работе, приведены в (Семенов, 2018). Поэтому здесь мы лишь кратко напомним методологию.

| Обозначение | Полное название | Расположение |
|-------------|------------------|----------------|
| ALT | Alert | Канада |
| ESP | Estevan Point | Канада |
| SIS | Shetland Islands | Великобритания |
| MLO | Mauna Loa | CIIIA |
| CRI | Cape Rama | Индия |
| CFA | Cape Ferguson | Австралия |
| CGO | Cape Grim | Австралия |
| СҮА | Casey | Антарктида |
| MAA | Mawson | Антарктида |
| MQA | Macquarie Island | Австралия |
| SPO | South Pole | Антарктида |

Таблица 1. Названия станций сети CSIRO и места их расположения

Исходя из временного ряда среднемесячных концентраций, строились три других ряда², которые будут обозначаться латинскими символами A, B и (B-A) (иллюстрация приведена на рис. 2):

А) ряд скользящих среднегодовых значений, т.е. ряд средних 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;

B) ряд скользящих двухмесячных средних значений; для этого же срока его элемент - среднее за 6-й и 7-й месяцы;

B-A) разность рядов B и A.



Рисунок 2. Схема формирования временных рядов А и В

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

А-ряды используются для описания изменений уровня содержания газа в <u>годовом масштабе времени</u>, т.е. при 12-тимесячном скользящем осреднении. (*B-A*)-ряды, т.е. <u>ряды сезонных девиаций</u>, используются для описания сезонной изменчивости.

При сопоставлении (*B*-*A*)-рядов для различных точек географического пространства и/или различных газов применяются сдвиги во времени. При

²⁾ Различия в продолжительности месяцев в этих построениях игнорируются.

этом будет всегда рассматриваться упорядоченная пара рядов $\{X(t)\}$ и $\{Y(t)\}$, а сдвигаться будет второй ряд. Сдвиг второго ряда будет осуществляться путем перехода к ряду $\{Y(t + \tau)\}$. При $\tau > 0$ этот сдвиг будет называться «сдвигом против времени на τ месяцев», а при $\tau < 0$ этот сдвиг будет называться «сдвигом по времени на $|\tau|$ месяцев». Оптимальный сдвиг τ – тот, который обеспечивает максимальную корреляцию рядов. При этом применяется требование -6 < $\tau < 6$, поскольку по смыслу прибавление или же вычитание числа месяцев, кратного 12, не приводит к изменению сезона.

В этой статье (*B*-*A*)-ряды используются также при оценке многолетнего внутригодового хода сезонных девиаций концентраций и их стандартных отклонений. Отметим, что их сходство для какой-либо пары рядов и сходство собственно многолетних рядов сезонных девиаций – разные вещи. Второе влечет за собой первое, но обратное может не иметь место.

Результаты и обсуждение

Изменения в годовом масштабе времени

На рис. 3 и 4 приведены A-ряды для 11 станций для CO_2 и N_2O соответственно. В работе (Семенов, 2018) при изучении таких многолетних изменений содержания метана данные приводились к значениям на станции Alert³ путем удаления систематических различий в данных. Это было необходимо, поскольку среднегодовые концентрации метана существенно различаются на разных широтах, в разных полушариях. Однако, в случае CO_2 и N_2O мы этого делать не стали, поскольку после такого приведения данных кривые практически сливаются и плохо различимы на графиках.

Как видно на рис. 3, для CO₂ тренды на разных станциях примерно одинаковы. Исключение – тропическая станция Саре Rama (Индия), по-видимому, находящаяся под сильным влиянием региональных источников углекислого газа.





³⁾ Самая северная станция Северного полушария; ее выбор, конечно, условен.

На рис. 4 приведены аналогичные данные по закиси азота. Многолетние тренды содержания этого газа на разных станциях также сходны. Это касается и станции Саре Rama, данные с которой в отношении закиси азота не показывают существенного аномального поведения.





Внутригодовой ход сезонных девиаций содержания газов

Для каждой станции и для каждого газа были рассчитаны многолетние средние для элементов (*B*-*A*)-рядов, ассоциированных с каждым из 12 календарных месяцев, и оценены стандартные отклонения этих значений. Определенный таким образом внутригодовой ход сезонных девиаций содержания газов будет рассматриваться как сезонный ход их концентраций. На рис. 5а, 5б и 5в представлены результаты этих вычислений для CO_2 , CH_4 и N_2O соответственно⁴.

Кривая, изображенная сплошной линией, указывает на изменение среднего многолетнего значения от месяца к месяцу, вертикальные границы бокса - интервал $\pm \sigma$ вокруг среднего, а вертикальный отрезок показывает диапазон всех значений.

На графиках на рис. 5а заметно, что в обоих полушариях убывание уровня CO_2 начинается примерно с началом вегетационного периода, а нарастание – с его окончанием. Это вполне укладывается в представление о роли растений (наземных и океанских) в захвате CO_2 из атмосферы в ходе фотосинтеза (Keeling et al., 2005). Надо, однако, иметь в виду, что в теплый период года пониженная растворимость CO_2 в поверхностных океанских водах и повышенное физическое выделение CO_2 океаном могут отчасти компенсировать эффект усиленного поглощения при увеличении интенсивности фотосинтеза.

⁴⁾ На рис. 5a, 5b и 5c каждое такое многолетнее среднее значение (представлено на вертикальной оси), отнесено ко второму месяцу (представлен на горизонтальной оси) из соответствующих двух, по которым вычислялось среднее двухмесячное значение.



Рисунок 5а. Сезонный ход концентрации CO₂ (млн⁻¹)

Картина сезонных изменений на тропических станциях Саре Rama и Саре Ferguson менее четкая, хотя в целом сходная. Отметим некоторую особенность сезонного хода CO_2 на станции Mauna Loa, расположенной в тропических широтах: там убывание уровня от максимального начинается несколько позже, чем на более северных станциях Северного полушария. То же справедливо для начала возрастания уровня от минимального. Это явление требует специального исследования. Возможно, это связано с высокогорным расположением этой станции (З 397 м над уровнем моря). Остальные станции Северного полушария расположены существенно ниже над уровнем океана. На тропической станции Саре Rama процесс убывания концентрации от максимального значения ожидаемо начинает развиваться раньше, чем на внетропических станциях Северного полушария.

На станциях Южного полушария периоды сезонного убывания и возрастания уровня CO₂ очень сходны.

На рис. 56 представлены данные о сезонном ходе уровня содержания метана CH₄. На станциях Южного полушария периоды сезонного убывания и возрастания уровня метана очень близки, как и форма кривых внутригодового хода. Период возрастания – весна-осень⁵ (холодное время года), далее – период убывания.



Рисунок 56. Сезонный ход концентрации CH₄ (млрд⁻¹)

В Северном полушарии формы кривых заметно различаются. Однако практически на всех станциях активное убывание начинается весной и заканчивается к осени (в августе). Исключение – тропическая станция Саре Rama, где период возрастания существенно короче, и убывание содержания метана возобновляется уже в ноябре.

⁵⁾ Здесь и далее название сезона соответствует сезону Северного полушария.

Сезонный ход концентраций CH₄, представленный на рис. 5б, совместим с представлениями о том, что в процессе сезонного убывания уровня метана существенную роль играет обогащение нижней атмосферы гидроксилом вследствие сезонного увеличения потока солнечной радиации, достигающего земной поверхности. Ведь реакция с гидроксилом – основной сток метана в нижней атмосфере (Voulgarakis et al., 2013).

На рис. 5в представлен сезонный ход уровня содержания N₂O. Он весьма незначителен – его амплитуда меньше 0.5 млрд⁻¹. Лишь на тропической станции Саре Rama она несколько больше. На этой станции заметно выше и межгодичная изменчивость сезонных девиаций, особенно в теплый период года. На высокогорной (3 397 м над уровнем моря) тропической станции Mauna Loa сезонный ход уровня закиси азота практически отсутствует.



Рисунок 5в. Сезонный ход концентрации N₂O (млрд⁻¹)

Многолетние ряды сезонных девиаций

Сравнительный анализ рядов сезонных девиаций содержания CO_2 , CH_4 и N_2O в атмосфере на станциях сети CSIRO проводился следующим образом. Для каждой <u>упорядоченной пары</u> станций рассматривались их (*B-A*)-ряды. Ряд для второй станции смещался во времени на несколько месяцев, от -6 до 6, относительно первого. Затем рассчитывался коэффициент корреляции рядов и определялся оптимальный сдвиг, обеспечивающий максимальное значение коэффициента корреляции. Таким образом, изучалось не сходство внутригодового хода сезонных девиаций, чему посвящен предыдущий раздел, а сходство собственно временных рядов сезонных девиаций.

Сезонные изменения содержания в атмосфере CO₂, CH₄ и N₂O на станциях глобального мониторинга могут определяться тремя процессами:

 – обменом воздушными массами «местной» части атмосферы с глобальной атмосферой во всех направлениях (влияние локальных источников отсутствует, что должно обеспечиваться выбором станции глобального мониторинга);

- обменом с океаном и сушей;

- расходованием веществ в химических реакциях в атмосфере.

Эти процессы в разной степени принимают участие в сезонных изменениях содержания трех рассматриваемых газов.

Первый процесс – процесс атмосферного переноса, имеющий вертикальную и горизонтальную составляющие – <u>общий</u> для трех рассматриваемых газов. Его характерное время – не более нескольких месяцев, т.е. существенно меньше времени жизни этих газов в атмосфере, которое составляет от примерно десятилетия до порядка столетия (Forster et al., 2007, section 2.10.2; Myhre et al., 2013). Может ли этот процесс обеспечить сходство сезонных девиаций концентраций рассматриваемых газов на различных станциях?

В табл. 3 приведены коэффициенты корреляции для рядов сезонных девиаций закиси азота N₂O. Корреляции (R) в подавляющем большинстве случаев невелики ($R^2 < 0.5$), в особенности, для станций Северного полушария. Исключение – заметное, хотя и невысокое, сходство рядов сезонных девиаций на полярных станциях Alert (ALT), South Pole (SPO) и Cape Grim (CGO); при оптимальных сдвигах во времени $R^2 > 0.5$. Если для пары станций SPO и CGO это можно объяснять относительной географической близостью станций, то для пары ALT и SPO, а также для пары ALT и CGO, этого сделать нельзя. Пара рядов для станций ALT и SPO представлена на рис. 6, и их заметное, хотя и невысокое, сходство требует дальнейших исследований.

В целом, однако, данные табл. З указывают на то, что процессы атмосферного переноса в большинстве случаев не могут обеспечить существенного сходства многолетних рядов сезонных девиаций фонового содержания N_2O , а, следовательно, и двух других газов. Ведь, напомним, что в тропосфере N_2O практически стоков не имеет, а его время жизни в атмосфере более 100 лет (Myhre et al., 2013). Так, что его сезонная изменчивость на рассматриваемых станциях может управляться лишь двумя процессами: глобальными эмиссиями и атмосферным переносом. Первый процесс для каждого из рассматриваемых

емых газов индивидуален, а второй – общий. И этот, последний процесс в целом не обеспечивает заметного сходства временных рядов девиаций на разных станциях, судя по данным о N₂O.

| | SPO | MAA | CYA | MQA | CGO | CFA | CRI | MLO | ESP | SIS | ALT |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| SPO | 1.00 | 0.56 | 0.67 | 0.54 | 0.80 | 0.53 | 0.62 | 0.32 | 0.34 | 0.50 | 0.72 |
| | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 5 | 3 | 3 |
| MAA | 0.56 | 1.00 | 0.55 | 0.48 | 0.59 | 0.48 | 0.42 | 0.33 | 0.28 | 0.44 | 0.59 |
| | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 5 | 4 | 4 |
| CYA | 0.67 | 0.55 | 1.00 | 0.65 | 0.67 | 0.54 | 0.58 | 0.30 | 0.67 | 0.48 | 0.67 |
| | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 3 | 3 | 3 |
| MQA | 0.54 | 0.48 | 0.65 | 1.00 | 0.62 | 0.43 | 0.37 | 0.20 | 0.43 | 0.57 | 0.61 |
| | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 | 4 | 3 | 3 |
| CGO | 0.80 | 0.59 | 0.67 | 0.62 | 1.00 | 0.58 | 0.66 | 0.30 | 0.39 | 0.55 | 0.73 |
| | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 5 | 3 | 3 |
| CFA | 0.53 | 0.48 | 0.54 | 0.43 | 0.58 | 1.00 | 0.39 | 0.34 | 0.38 | 0.41 | 0.56 |
| | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 | 0 | -1 | 2 | 6 | 2 | 3 |
| CRI | 0.62 | 0.42 | 0.58 | 0.37 | 0.66 | 0.39 | 1.00 | 0.29 | 0.28 | 0.64 | 0.71 |
| | 0 | -1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 3 | -6 | 3 | 3 |
| MLO | 0.32 | 0.33 | 0.30 | 0.20 | 0.30 | 0.34 | 0.29 | 1.00 | 0.29 | 0.19 | 0.24 |
| | -1 | -1 | 0 | 1 | -1 | -2 | -3 | 0 | 4 | 4 | 3 |
| ESP | 0.34 | 0.28 | 0.67 | 0.43 | 0.39 | 0.38 | 0.28 | 0.29 | 1.00 | 0.43 | 0.46 |
| | -5 | -5 | -3 | -4 | -5 | -6 | 6 | -4 | 0 | -1 | -1 |
| SIS | 0.50 | 0.44 | 0.48 | 0.57 | 0.55 | 0.41 | 0.64 | 0.19 | 0.43 | 1.00 | 0.62 |
| | -3 | -4 | -3 | -3 | -3 | -2 | -3 | -4 | 1 | 0 | 0 |
| ALT | 0.72 | 0.59 | 0.67 | 0.61 | 0.73 | 0.56 | 0.71 | 0.24 | 0.46 | 0.62 | 1.00 |
| | -3 | -4 | -3 | -3 | -3 | -3 | -3 | -3 | 1 | 0 | 0 |

Таблица 3. Коэффициенты корреляции временных рядов сезонных девиаций содержания N2O

Примечание. В упорядоченной паре станций первая указана в первом столбце таблицы, а вторая – в первой строке. Под значением коэффициента корреляции указан оптимальный сдвиг во времени в месяцах. Заливкой выделены блоки, соответствующие станциям Южного (желтый) и Северного (голубой) полушарий

Иная ситуация с CO₂ и CH₄. Расчеты показали, что для (*B*-*A*)-рядов даже очень удаленных друга от друга станций корреляции высоки. Колебания демонстрируют сезонную цикличность и имеют довольно устойчивую форму.

На рис. 7а для CO₂ приведены графики (*B-A*)-рядов для станций ALT и MLO, а на рис. 76 – для станций ALT и SPO. Коэффициенты корреляции для этих рядов составляют 0.95 (ряд станции MLO сдвинут на 1 месяц против времени) и 0.87 (ряд станции SPO сдвинут на 5 месяцев по времени) соответственно. Корреляция высока, хотя станции расположены весьма далеко друг от друга – ALT в высоких широтах Арктики, MLO в тропической части Тихого океана, а SPO – на Южном полюсе. Для всей совокупности станций

типично, что амплитуды станционных рядов убывают в направлении от северной полярной зоны к южной.



Рисунок 6. Сезонные девиации уровня N₂O на станциях Alert (ALT) и South Pole (SPO); последний ряд сдвинут по времени на 3 месяца, млрд⁻¹

Коэффициенты корреляции (*B-A*)-рядов для CO₂ приведены в табл. 4. Для внетропических в обоих полушариях корреляция высока – от 0.8 до 0.9 и более при соответствующих оптимальных временных сдвигах; для станций Северного полушария они особенно велики – больше 0.9. Для тропических станций CFA и CRI они заметно меньше, 0.5-0.8.

Из данных табл. 4 видно, что оптимальные сдвиги примерно отражают широтную сезонность. Для расположенных в умеренной и полярной зонах станций Северного полушария по отношению к станциям Южного полушария эти сдвиги составляют 5-7 месяцев⁶.

На сезонность колебаний концентрации углекислого газа указывалось еще в классической работе (Keeling et al., 2005). Это явление связывалось с активизацией фотосинтеза в теплое время года. В последнее время эти сезонные колебания изучаются также и дистанционными методами, по данным спутникового зондирования – см., например, (Рокотян и др., 2014). В этой работе приведена обширная библиография по этому вопросу.

В еще большей степени сходство рядов сезонных девиаций уровня содержания в атмосфере на станциях CSIRO выражено для CH₄. Это достаточно подробно охарактеризовано в работе (Семенов, 2018). Оценки коэффициентов корреляции между внетропическими станциями Южного полушария не менее 0.99 и лишь для тропической станции CFA 0.94 - 0.96. Эти уровни корреляции достигаются при соответствующих оптимальных временных сдвигах.

⁶⁾ Сдвиги на (-5) или (-6) месяцев сезонно эквивалентны сдвигам соответственно на 7 и 6 месяцев.

(*B-A*)-ряды для станций Северного полушария также – при соответствующих оптимальных сдвигах – характеризуются значительными коэффициентами корреляции, в большинстве случаев 0.7 - 0.8. Однако они заметно ниже значений для Южного полушария.

(B-A)-ряды для CH₄ со станций разных полушарий также весьма сходны с учетом соответствующих сезонных сдвигов. Например, (B-A)-ряды, построенные для станций Южного полушария, имеют высокую корреляцию с рядом высокоширотной арктической станцией Alert (ALT, 82.5° с.ш.). Значения коэффициентов корреляции рядов с этих станций с рядом станции ALT следующие: 0.92 для SPO, 0.91 для MAA, 0.91 для CYA, 0.94 для MQA и 0.89 для CFA. Однако, чтобы добиться такого сходства, необходимо сдвинуть ряд станции ALT против времени на 5 месяцев.



Рисунок 7. Сезонные девиации уровня CO₂ а) на станциях ALT и MLO (ряд станции MLO сдвинут на 1 месяц против времени); б) на станциях ALT и SPO (ряд станции SPO сдвинут на 5 месяцев по времени)

| | SPO | MAA | CYA | MQA | CGO | CFA | CRI | MLO | ESP | SIS | ALT |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| SPO | 1.00 | 0.91 | 0.91 | 0.86 | 0.91 | 0.51 | 0.71 | 0.87 | 0.86 | 0.88 | 0.87 |
| | 0 | 0 | 0 | -1 | 0 | 2 | 5 | -6 | 5 | 5 | 5 |
| MAA | 0.91 | 1.00 | 0.91 | 0.87 | 0.93 | 0.49 | 0.77 | 0.90 | 0.87 | 0.90 | 0.84 |
| | 0 | 0 | 0 | -1 | 0 | 2 | 5 | -5 | 5 | 5 | -6 |
| CYA | 0.91 | 0.91 | 1.00 | 0.91 | 0.93 | 0.48 | 0.75 | 0.89 | 0.84 | 0.85 | 0.83 |
| | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 5 | -5 | 5 | 5 | -6 |
| MQA | 0.86 | 0.87 | 0.91 | 1.00 | 0.88 | 0.53 | 0.72 | 0.86 | 0.81 | 0.85 | 0.84 |
| | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 | -6 | -5 | 6 | 6 | 6 |
| CGO | 0.91 | 0.93 | 0.93 | 0.88 | 1.00 | 0.53 | 0.74 | 0.87 | 0.81 | 0.84 | 0.80 |
| | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 5 | -5 | 5 | 5 | -6 |
| CFA | 0.51 | 0.49 | 0.48 | 0.53 | 0.53 | 1.00 | 0.48 | 0.53 | 0.51 | 0.51 | 0.50 |
| | -2 | -2 | -2 | -2 | -2 | 0 | 3 | 5 | 4 | 4 | 4 |
| CRI | 0.71 | 0.77 | 0.75 | 0.72 | 0.74 | 0.48 | 1.00 | 0.77 | 0.60 | 0.64 | 0.69 |
| | -5 | -5 | -5 | 6 | -5 | -3 | 0 | 2 | 0 | 0 | 1 |
| MLO | 0.87 | 0.90 | 0.89 | 0.86 | 0.87 | 0.53 | 0.77 | 1.00 | 0.93 | 0.94 | 0.95 |
| | 6 | 5 | 5 | 5 | 5 | -5 | -2 | 0 | -1 | -1 | -1 |
| ESP | 0.86 | 0.87 | 0.84 | 0.81 | 0.81 | 0.51 | 0.60 | 0.93 | 1.00 | 0.98 | 0.98 |
| | -5 | -5 | -5 | -6 | -5 | -4 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| SIS | 0.88 | 0.90 | 0.85 | 0.85 | 0.84 | 0.51 | 0.64 | 0.94 | 0.98 | 1.00 | 0.98 |
| | -5 | -5 | -5 | -6 | -5 | -4 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| ALT | 0.87 | 0.84 | 0.83 | 0.84 | 0.80 | 0.50 | 0.69 | 0.95 | 0.98 | 0.98 | 1.00 |
| | -5 | 6 | 6 | -6 | 6 | -4 | -1 | 1 | 0 | 0 | 0 |

Таблица 4. Коэффициенты корреляции временных рядов сезонных девиаций содержания СО2

Примечание. В упорядоченной паре станций первая указана в первом столбце таблицы, а вторая – в первой строке. Под значением коэффициента корреляции указан оптимальный сдвиг во времени в месяцах. Заливкой выделены блоки, соответствующие станциям Южного (желтый) и Северного (голубой) полушарий

И, наконец, приведем на рис. 8 значения оценок коэффициентов корреляции (*B-A*)-рядов для CH_4 и CO_2 , которые достигаются при оптимальных временных сдвигах ряда для CO_2 . Такие значения коэффициентов корреляции для внетропических станций достигаются без сдвига во времени или же со сдвигом против времени на 1 мес.

Заметим, что на внетропических станциях корреляции высоки – больше 0.88, а в большинстве случаев больше 0.9. Это позволяет предполагать, что сезонные девиации уровней CH_4 и CO_2 в основном вызваны единым фактором, который имеет очень четкое сезонное проявление. На роль такого фактора логически может претендовать сезонная вариабельность потока солнечного излучения, достигающего земной поверхности. Его усиление и стимулирует фотосинтез наземных и океанских растений (тем самым усиливая сток CO_2 из атмосферы), и стимулирует образование гидроксила (в реакциях с которым происходит сток метана из атмосферы).



Рисунок 8. Оценки коэффициента корреляции рядов сезонных девиаций концентраций CH₄ и CO₂ (левая вертикальная ось), которые достигаются при оптимальных временных сдвигах ряда для CO₂ (правая вертикальная ось)

Все обнаруженные в этом случае ненулевые оптимальные сдвиги – против времени. Это означает, что метановые «события» опережают события, связанные с углекислым газом. В том числе, период убывания уровня метана начинается раньше, чем углекислого газа.

Заключение

Результаты проведенного эмпирического анализа изменений концентраций CO₂, CH₄ и N₂O с 1990-х годов на станциях глобального мониторинга сети CSIRO можно суммировать следующим образом.

Для каждого из трех газов, долговременные тренды уровня его содержания в приповерхностном слое атмосферы в годовом масштабе времени, т.е. для 12-тимесячных скользящих средних (*А*-ряды), сходны на всех станциях. Исключение – ряды для CO₂ и CH₄ на станции Саре Rama, которая, по-видимому, находится под воздействием крупных локальных или же региональных источников эмиссии.

Временные ряды разностей скользящих двухмесячных значений среднемесячных концентраций газов и скользящих 12-месячных значений ((B-A)-ряды) характеризуют сезонную изменчивость содержания газов. Эти ряды девиаций имеют выраженную сезонность и достаточно устойчивую от года к году (для СО₂ и CH₄) форму внутригодовых колебаний. Коэффициенты корреляции временных рядов для CO₂ и CH₄ для внетропических станций оказались значительными после применения соответствующих оптимальных временных сдвигов даже для станций, расположенных в разных полушариях. Оптимальные сдвиги имеют сезонный характер.

Эти свойства не характерны для N_2O . Поэтому упомянутое сходство не может быть следствием процессов атмосферного переноса, который общий для трех рассматриваемых газов.

Сходство рядов сезонных девиаций концентраций CO_2 и CH_4 на различных станциях поддерживает следующее представление: сезонной изменчивостью концентраций CO_2 и CH_4 управляют соответственно процессы удаления CO_2 из атмосферы при фотосинтезе растений и разрушения CH_4 в реакциях с гидроксил-радикалом; сезонная изменчивость этих процессов связана с сезонными колебаниями потока солнечной радиации, достигающего земной поверхности.

Благодарности

Авторы признательны Полу Краммелу и Рэю Лангенфельдсу (CSIRO) за полезные консультации по данным мониторинга.

Список литературы

Рокотян Н.В., Imasu R., Захаров В.И., Грибанов К.Г., Хаматнурова М.Ю. 2014. Амплитуда сезонного цикла CO₂ в атмосфере Уральского региона по результатам наземного и спутникового ИК-зондировани. – Оптика атмосферы и океана, т. 27, № 96, с. 819-825.

Семенов С.М. 2018. Сходство современных изменений фоновых концентраций метана в приповерхностном слое атмосферы на различных широтах. – Фундаментальная и прикладная климатология, т. 3, с. 82-95.

Forster P., Ramaswamy V., Artaxo P., Berntsen T., Betts R., Fahey D.W., Haywood J., Lean J., Lowe D.C., Myhre G., Nganga J., Prinn R., Raga G., Schulz M., Van Dorland R. 2007. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. – In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change /Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.). – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Keeling C.D., Piper S.C., Bacatow R.B., Wahlen M., Whorf T.P., Heimann P.M., Meijer H.A. 2005. Atmospheric CO_2 and ${}^{13}CO_2$ exchange with the terrestrial biosphere and oceans from 1978 to 2000: observations and carbon cycle implications. – In "A History of Atmospheric CO_2 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.

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.

Steele L.P., Krummel P.B., Langenfelds R.L. 2007. Atmospheric CO₂ concentrations from sites in the CSIRO Atmospheric Research GASLAB air sampling network (August 2007 version). – In Trends: A Compendium of Data on Global Change. – Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, TN, U.S.A.

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: 01.11.2018 г.

После переработки: 04.11.2018 г.