

СОВРЕМЕННОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА В ПРИПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ: МНОГОЛЕТНИЕ ТРЕНДЫ И ВНУТРИГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ

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

¹⁾ Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля, Россия, 107258, Москва, ул. Глебовская, д. 20Б; **SergeySemenov1@yandex.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. Проведен анализ рядов среднемесячных уровней содержания диоксида углерода (CO_2) в приповерхностном слое атмосферы за последние 50 лет, представленных на двух общедоступных интернет-ресурсах – сайтах Мирового центра данных по парниковым газам Глобальной службы атмосферы (Всемирная метеорологическая организация) и Лаборатории исследования земной системы Национального управления океанических и атмосферных исследований (США). Рассмотрены 80 стационарных рядов, из которых 27 – с глобальных (фоновых) станций, а остальные – с региональных станций. Многолетние изменения характеризовались рядами двенадцатимесячных скользящих средних, а внутригодовая межмесячная изменчивость – разностью исходного ряда и ряда, характеризующего многолетние изменения. Исследование систематических различий показало, что наибольшие уровни содержания CO_2 характерны для регионов с развитой хозяйственной деятельностью, находящихся в Северной Америке, Западной и Центральной Европе, на юго-востоке Азии. Многолетние изменения (тренды) на всех станциях совпадают с глобальными фоновыми изменениями. Внутригодовая изменчивость имеет регулярный сезонный характер, причем наблюдаются весьма высокое сходство (высокая корреляция) сезонных отклонений от линии многолетних трендов в разных точках географического пространства при соответствующих сезонных временных сдвигах. Среднеквадратические отклонения рядов внутригодовых отклонений максимальны в регионах с развитой хозяйственной деятельностью, находящихся в Северной Америке и Западной и Центральной Европе. Они меньше в высоких широтах Северного полушария, а в Южном полушарии заметно меньше и убывают с широтой.

Ключевые слова. Диоксид углерода, данные, мониторинг, среднемесячные концентрации, многолетние изменения, внутригодовая изменчивость, глобальный анализ.

Введение

Антропогенные выбросы парниковых газов приводят к существенному обогащению атмосферы этими веществами. Это усиливает парниковый эффект, что способствует глобальному потеплению и сопутствующим изменениями других параметров климата. Некоторые последствия этого оцениваются негативно, что вызывает известную обеспокоенность и совместные усилия мирового сообщества по изучению этих последствий (IPCC, 2018) и ограничению изменения глобального климата (РКИК ООН, 1992; Киотский протокол, 1997; Парижское соглашение, 2015).

Для корректного обоснования соответствующих мер необходимо иметь надежную информацию об объемах глобальных антропогенных выбросов парниковых газов и тенденциях изменения их содержания в атмосфере. Информация о глобальных антропогенных выбросах собирается в странах и ежегодно представляется в Секретариат Рамочной конвенции ООН об изменении климата – РКИК ООН. Осуществляются крупные международные научно-исследовательские проекты по оценке эмиссий парниковых газов с земной поверхности в атмосферу, такие как Глобальный углеродный проект, Global Carbon Project. Его цель – оценка глобальных бюджетов диоксида углерода, метана и закиси азота (см., например, (Le Quéré et al., 2018)). Среди входящих в состав антропогенных выбросов, эти парниковые газы обладают наибольшим радиационным воздействием (radiative forcing).

Информация об уровнях содержания парниковых газов в атмосфере собирается на станциях мониторинга, где осуществляются соответствующие программы измерений. Она ежегодно обобщается в изданиях Всемирной метеорологической организации (см., например, (The State of Greenhouse Gases..., 2018)). На национальном уровне наиболее мощными сетями таких станций обладают США (станции Национального управления океанических и атмосферных исследований, National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA) и Австралия (станции Научно-промышленной исследовательской организация Содружества наций, The Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation – CSIRO). На международном уровне значительная часть национальных станций мониторинга объединена в сеть ГСА – Глобальной службы атмосферы (GAW – Global Atmosphere Watch) под эгидой Всемирной метеорологической организации (ВМО). Эти станции, расположенные на материках и островах в океане, 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) и национальных базах данных, в том числе на интернет-ресурсе Лаборатории исследования земной системы (Earth System Research Laboratory – ESRL) США. Центр WDCGG работает под оперативным управлением Метеорологического агентства Японии (Japan Meteorological Agency - JMA). На ресурсе <https://gaw.kishou.go.jp/> в том числе расположены данные об

уровнях содержания CO_2 , CH_4 , N_2O и некоторых других парниковых газов в приповерхностном слое атмосферы. Лаборатория ESRL работает в системе Национального управления океанических и атмосферных исследований США. Эти данные получены в ходе измерений *in situ* или же последующего лабораторного анализа проб воздуха, отобранных в специальные емкости.

Цель данной статьи, исходя из стационарных рядов среднемесячных данных о содержании CO_2 в приповерхностном слое атмосферы, имеющих доступ в WDCGG и на сайте ESRL, изучить глобальное географическое распределение:

- многолетних трендов в содержании CO_2 в приповерхностном слое атмосферы, и
- параметров изменчивости, остающейся после исключения многолетних трендов из рядов месячных данных.

Данные и методы

Систематические измерения содержания CO_2 в приповерхностном слое атмосферы начались во второй половине XX века. Это событие связано с именем Ч.Д. Килинга (Keeling et al., 2005), который с 1958 г. осуществлял такие измерения на станции Мауна-Лоа (Гавайи, США). Историческую справку можно найти в (Семенов, 2018а).

В данной работе анализируются 80 стационарных рядов данных. Большинство станций входит в сеть NOAA, а меньшая часть – в сеть CSIRO. Станции распределены глобально – на всех континентах и океанах. При этом 4 станции входят в обе сети, но их ряды данных немного отличаются друг от друга (различия в отдельных данных могут достигать 2%), по-видимому, по методическим причинам. Из всей совокупности рассматриваемых станций 26 имеют статус глобальных. Они находятся вне прямого влияния каких-либо заметных локальных или региональных источников антропогенной эмиссии парниковых газов. Мы будем считать, что они представляют глобальное фоновое изменение содержания CO_2 в приповерхностном слое атмосферы. Остальные станции имеют статус региональных. Их ряды данных по замыслу должны представлять региональные тренды. На рис. 1 представлена вся совокупность станций. Перечень глобальных станций, используемых в данной статье для характеристики изменения глобального фонового содержания CO_2 , приведен в табл. 1.

Обозначим через $\{A(n)\}$ стационарный ряд среднемесячных концентраций. Для данной станции $n = 1$ соответствует тому месяцу, когда впервые были проведена оценка среднемесячной концентрации, а $n = N$ соответствует порядковому номеру последнего месяца, для которого есть значения среднемесячной концентрации. Нумерация месяцев – сплошная. За какие-то месяцы значения среднемесячных концентраций могут отсутствовать. Способ анализа данных, излагаемый ниже, является модификацией метода, предложенного в работе (Semenov, 2018) и использованный для анализа рядов CO_2 , CH_4 и N_2O в работе (Semenov, Rankova, 2018).

Таблица 1. Станции мониторинга, имеющие статус глобальных
(<https://www.esrl.noaa.gov/gmd/dv/data/>)

Название	Широта, °	Долгота, °	Высота, м н.у.м.	Принад- лежность или расположение
Cape Grim	-40.68	144.69	94	Австралия
Assekrem	23.27	5.63	2710	Алжир
Barrow	71.32	-156.61	11	США
Halley	-75.57	-25.50	30	США
Tenerife	28.31	-16.50	2373	Испания
Mace Head	53.33	-9.90	5	Ирландия
Mauna Loa	19.54	-155.58	3397	США
Samoa (Cape Matatula)	-14.25	-170.56	77	США
South Pole	-90.00	-24.80	2841	США
Mt. Waliguan	36.29	100.90	3810	Китай
Zeppelin Mountain	78.91	11.89	475	Норвегия
Monte Cimone	44.17	10.68	2165	Италия
Cape Point	-34.35	18.49	230	Южная Африка
Minamitorishima	24.29	153.98	7	Япония
Mt. Kenya	-0.06	37.30	3678	Кения
Bukit Kototabang	-0.20	100.32	864	Индонезия
Ushuaia	-54.85	-68.31	18	Аргентина
Trinidad Head	41.05	-124.15	107	США
Arembepe	-12.77	-38.17	0	Бразилия
Alert	82.50	-62.34	210	Канада
Cape Rama	15.08	73.83	60	Индия
Casey	-66.28	110.52	47	Антарктика
Estevan Point	49.38	-126.53	7	Канада
Mawson	-67.62	62.87	32	Антарктика
Macquarie Island	-54.48	158.97	6	Австралия
Shetland Islands	60.09	-1.26	30	Шотландия

Далее, обозначим через $\{B(n)\}$ ряд скользящих двенадцатимесячных средних, соответствующих ряду $\{A(n)\}$ (пояснение – нас рис. 2):

$$B(n) = [0.5 A(n - 6) + A(n - 5) + \dots + A(n + 5) + 0.5 A(n + 6)] / 12.$$

Значения $B(n)$ вычисляются только для тех месяцев, для которых значения $A(n)$ за n -й месяц, предшествующие 6 месяцев и последующие 6 месяцев имеются. При вычислении скользящего среднего различия в продолжительности календарных месяцев не учитываются.

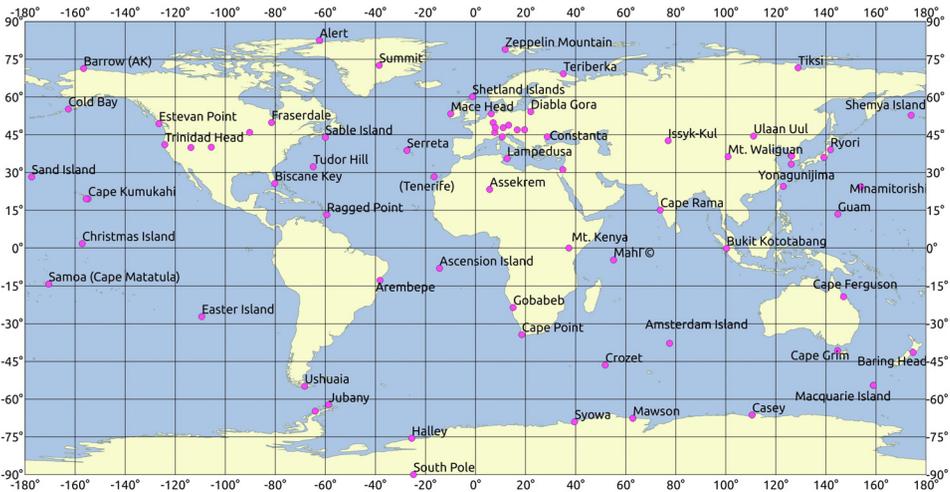


Рисунок 1. Станции, где осуществляется мониторинг уровней содержания CO₂ в приповерхностном слое атмосферы, данные которых используются в этой статье. Названия некоторых станций не приведены на этой карте-схеме, например, западноевропейских, из-за нехватки места на рисунке

Месяцы

n - 6	n - 5	n - 4	n - 3	n - 2	n - 1	n	n + 1	n + 2	n + 3	n + 4	n + 5	n + 6
-------	-------	-------	-------	-------	-------	---	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Рисунок 2. Серым цветом указан промежуток времени, использующийся при вычислении значения скользящего двенадцатимесячного среднего, соответствующего *n*-му месяцу; значения за первый и последний месяцы используются с коэффициентом 0.5

Именно ряд $\{B(n)\}$ используется для представления многолетнего изменения среднемесячной концентрации (многолетнего тренда, вообще говоря нелинейного). Однако абсолютные значения концентрации на разных станциях мониторинга могут иметь систематические различия, обусловленные особенностями той части географического пространства, где расположена станция. Поэтому, для сопоставления трендов на разных станциях эти различия следует элиминировать. В данной работе это достигается «приведением» двенадцатимесячных скользящих средних на всех рассматриваемых станциях к значениям для станции Alert – самой северной станции Северного полушария (82.5° с.ш.; 62.34° з.д.). А именно, для заданной станции определяются те месяцы, за которые имеются значения $B(n)$ и для этой станции, и для станции Alert¹⁾. Для этих месяцев вычисляются средние значения среднемесячных концентраций для данной станции (\bar{B}) и для станции Alert (\bar{B}_{Alert}). Далее, разность $\Delta\bar{B} = (\bar{B}_{Alert} - \bar{B})$ прибавляется ко всем эле-

¹⁾ При этом используется ряд станции Alert, имеющийся в базе данных ESRL/NOAA.

ментам ряда $\{B(n)\}$ для рассматриваемой станции. Полученный «приведенный» ряд обозначается $\{B^*(n)\}$. Выбор станции Alert для операции «приведения» в значительной мере условен. Ее преимущество – достаточно полный ряд данных и несомненно глобальный фоновый характер – это высокоширотная арктическая станция.

Для описания короткопериодной изменчивости ряда среднемесячных концентраций используется ряд $\{C(n)\}$, $C(n) = A(n) - B(n)$. Его значения определяются, конечно, лишь для тех n , для которых имеются соответствующие значения $A(n)$ и $B(n)$. Ряд $\{C(n)\}$ представляет изменчивость среднемесячных концентраций, оставшуюся после вычитания многолетнего тренда, который описывается рядом $\{B(n)\}$.

В данной работе будут охарактеризованы среднеквадратические значения рядов $\{C(n)\}$ для рассматриваемых станций, а также корреляции этих рядов для различных пар станций. При этом при вычислении корреляций будут применяться сдвиги рядов во времени: для $k \geq 0$ ряд $\{C(n + k)\}$ получается сдвигом исходного ряда $\{C(n)\}$ на k месяцев в направлении более ранних дат, а ряд $\{C(n - k)\}$ – на k месяцев в направлении более поздних дат. Для упорядоченной пары рядов оптимальным сдвигом называется такой сдвиг второго ряда на число месяцев от (-5) до 6, который обеспечивает максимальное значение корреляции рядов.

Результаты и обсуждение

Многолетние тренды и абсолютные уровни содержания

На рис. 3 изображены многолетние тренды среднемесячных концентраций CO_2 , представленные рядами $\{B^*(n)\}$, для 5 региональных станций – Deuselbach (Германия), Diabla Gora (Польша), Kollumerwaard (Нидерланды), Issyk-Kul (Киргизстан) и Constanta (Румыния), а также средний тренд для рядов с глобальных фоновых станций, изображенный красной линией. Эти 5 станций имеют максимальные по модулю отклонения от глобального фонового тренда, превосходящие 5 ppm. Мы их квалифицируем как аномальные и исключаем из дальнейшего рассмотрения.

На рис. 4 на панелях а) – г) красной линией изображено среднее изменение для рядов с глобальных фоновых станций. На каждой из панелей нанесены также соответствующие индивидуальные линии тренда – графики рядов $\{B^*(n)\}$, характеризующие долговременные изменения на всех рассматриваемых станциях (ГИ), северо-американских станциях (САИ), европейских станциях (ЕИ) и азиатских станциях (АИ). Они приведены синим цветом. При этом индивидуальные линии искусственно расширены, а красная линия сделана прерывистой, иначе графики были бы практически неразличимы, поскольку уклоняются от красной линии лишь на 1-2 ppm. Таким образом, все изображаемые линии тренда, характеризующие многолетние изменения, на рис. 4 практически совпадают.

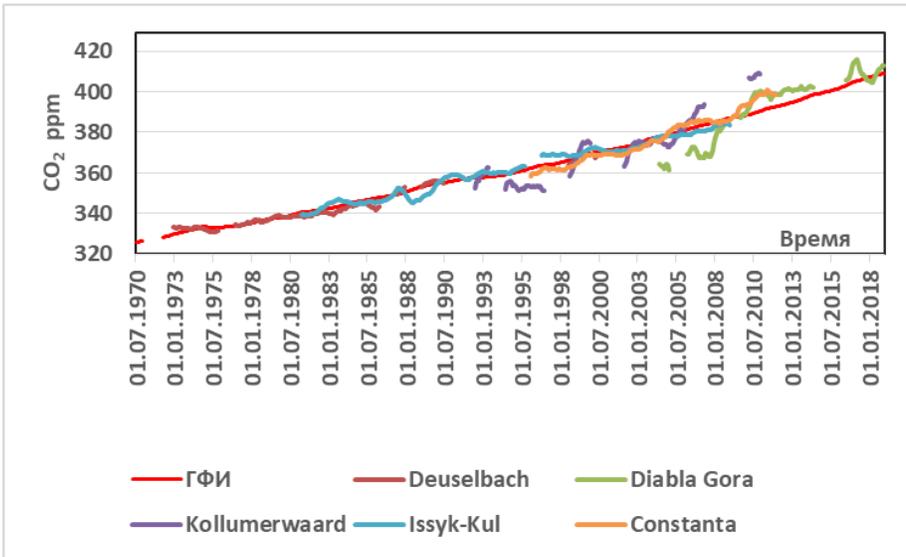
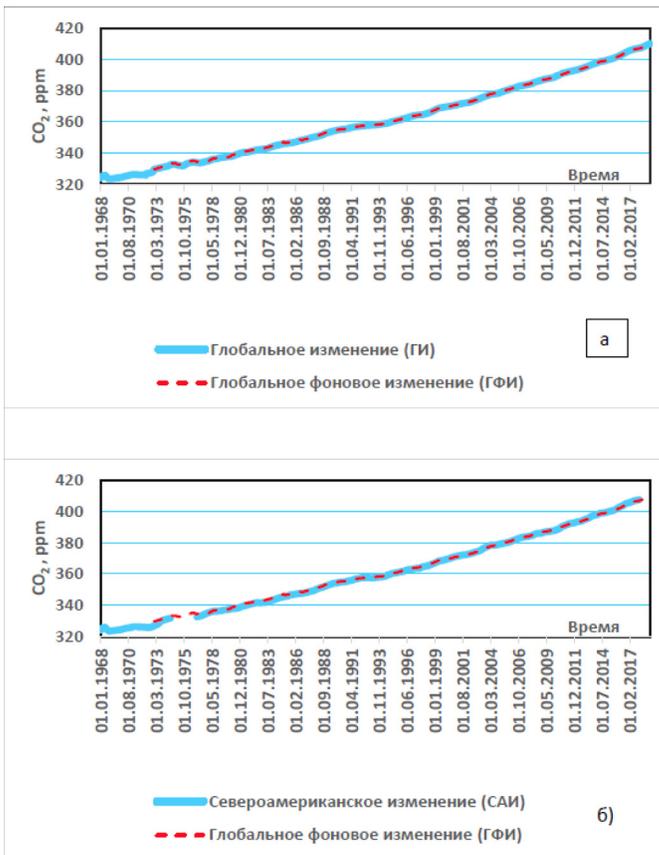


Рисунок 3. Среднее многолетнее глобальное фоновое изменение (ГФИ) содержания (ppm) CO₂ в приповерхностном слое атмосферы и индивидуальные многолетние изменения на станциях Deuselbach, Diabla Gora, Kollumerwaard, Issyk-Kul и Constanta



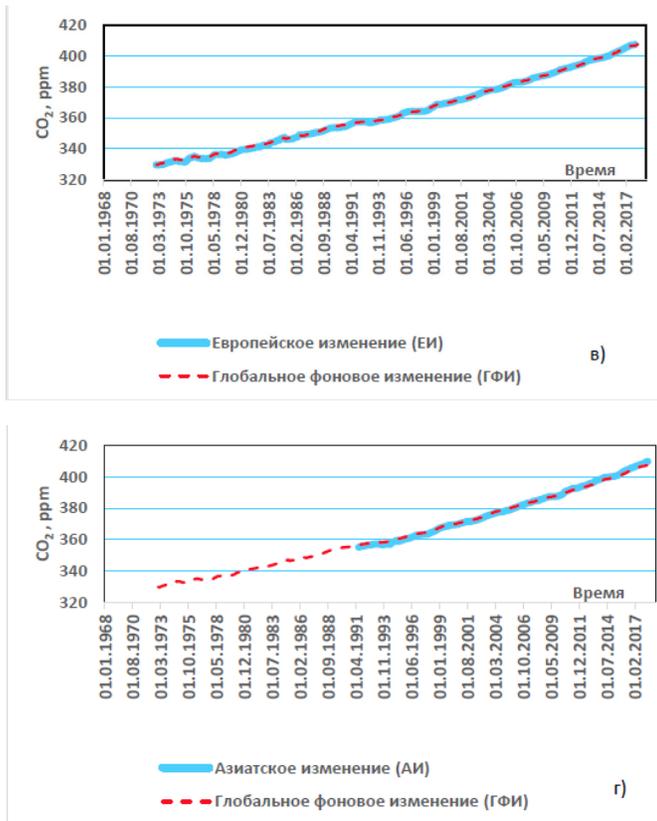


Рисунок 4. Многолетние изменения содержания CO₂ в приповерхностном слое атмосферы на станциях мониторинга (ppm); ГФИ – глобальное фоновое изменение (среднее по глобальным станциям) и индивидуально по станциям: ГИ – для всех станций (а); САИ – для североамериканских станций (б); ЕИ – для европейских станций (в); АИ – для азиатских станций (г)

Как видно на рис. 4, многолетние тренды содержания CO₂ в приповерхностном слое атмосферы на всех рассматриваемых станциях совпадают с глобальным трендом (заметим, нелинейным – рост концентрации ускоряется в XXI веке). Это совпадение, однако, не означает, что абсолютные уровни сходны на всех станциях. Этого было бы сложно ожидать, учитывая, что различные области на земной поверхности различаются и по интенсивности антропогенных эмиссий CO₂ в атмосферу, и по конкретным параметрам процесса поглощения и эмиссии CO₂ океаническими и наземными системами, и по интенсивности вертикального перемешивания в атмосфере.

Фактические данные подтверждают различия в абсолютных уровнях. На рис. 5 приведены значения разностей ($\bar{B}_{Alert} - \bar{B}$) для всех рассматриваемых станций. Эти разности (способ вычисления приведен в разделе «Данные и методы») характеризуют систематические различия в уровне содержания CO₂ на рассматриваемых станциях и выделенной станции Alert. На рис. 5 видно, что на континентальных станциях в Северной Америке и Евразии, особенно, в регионах с развитым хозяйством, многолетние уровни содержания CO₂, в основном, заметно превышают значения на станции Alert. В то же время, на

станциях Северного полушария, расположенных в более низких широтах, и на островных станциях уровни незначительно превышают уровни на станции Alert или же меньше их. В Южном полушарии многолетние уровни содержания CO_2 меньше, чем на станции Alert, причем с убыванием широты отличия становятся все заметнее и во внутритропической зоне повсеместно превышают 3 ppm.

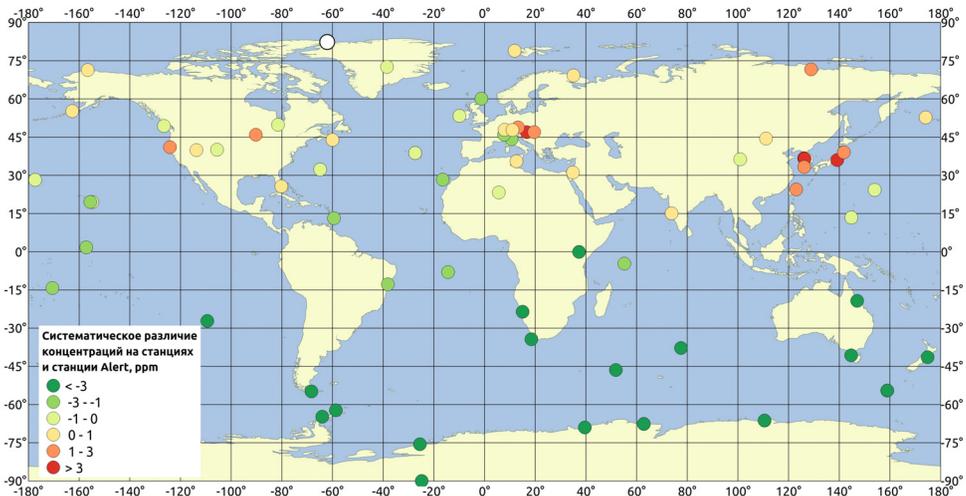


Рисунок 5. Систематические различия в многолетних уровнях содержания CO_2 на разных станциях мониторинга и станции Alert

Описанная картина вполне соответствует представлениям о тех процессах, которые участвуют в формировании глобального поля концентрации CO_2 : антропогенные эмиссии CO_2 , ассоциированные с хозяйственно развитыми регионами (в основном расположенными в Северном полушарии), горизонтальный перенос CO_2 в атмосфере (адвекция) и вертикальное перемешивание, частичное нетто-поглощение наземными экосистемами и океаном в ходе адвекции.

Внутригодовая изменчивость

Для характеристики внутригодовой, межмесячной изменчивости уровня содержания CO_2 на заданной станции мониторинга использовались ряды $\{C(n)\}$, $C(n) = A(n) - B(n)$, – результат вычитания из исходного ряда среднемесячных концентраций $\{A(n)\}$ многолетнего тренда, который описывается рядом двенадцатимесячных скользящих средних $\{B(n)\}$.

Для упорядоченной пары станций их ряды $\{C(n)\}$ будут характеризоваться:

- отношением среднеквадратического значения для второй станции по отношению к первой;
- оптимальным сдвигом ряда второй станции²⁾ $\{C(n+k)\}$ по времени на k месяцев, $-5 \leq k \leq 6$, при котором корреляция с рядом первой станции максимальна;
- значением этой максимальной корреляции.

²⁾ Сдвиг на k месяцев есть переход от ряда $\{C(n)\}$ к ряду $\{C(n+k)\}$.

Чтобы наглядно представить типичный вид ряда $\{C(n)\}$, на рис. 6 мы привели графики таких рядов: рядов для станций (а) Alert и Assekrem и (б) для станций Assekrem и Minamitorishima. При этом на панели а) ряд для станции Assekrem сдвинут на 1 мес. в направлении более ранних дат. Это – оптимальный сдвиг. На этих рисунках время на оси абсцисс измеряется от первого месяца начала изменений на станции Alert – декабрь 1985 г. На панели б) данные по станции Assekrem представлены точками, а не линией, поскольку иначе графики были бы практически неразличимы.

На рис. 6 видно, что на каждой станции отклонения $C(n)$ имеют сезонный характер и сходную форму в разные годы. Амплитуда колебаний на станции Alert заметно больше, чем на станции Assekrem (панель а)). Для станций Assekrem и Minamitorishima амплитуды практически одинаковы. В обоих случаях корреляции равны 0.94. При этом, заметим, что эти три станции – совсем не соседи: Alert – высокоширотная станция в Арктике (82.50° с.ш.; 62.34° з.д.; высота 210 м н.у.м.), Assekrem – высокогорная станция на севере Африки (23.27° с.ш.; 5.63° в.д.; высота 2 710 м н.у.м.), а Minamitorishima (24.29° с.ш.; 153.98° в.д.; 7 м н.у.м.) – станция на острове в Тихом океане, находящемся чуть севернее тропической зоны. Их высоты н.у.м. также очень разные. Тем ни менее, ряды отклонений $\{C(n)\}$ сходны – см. рис. 6.

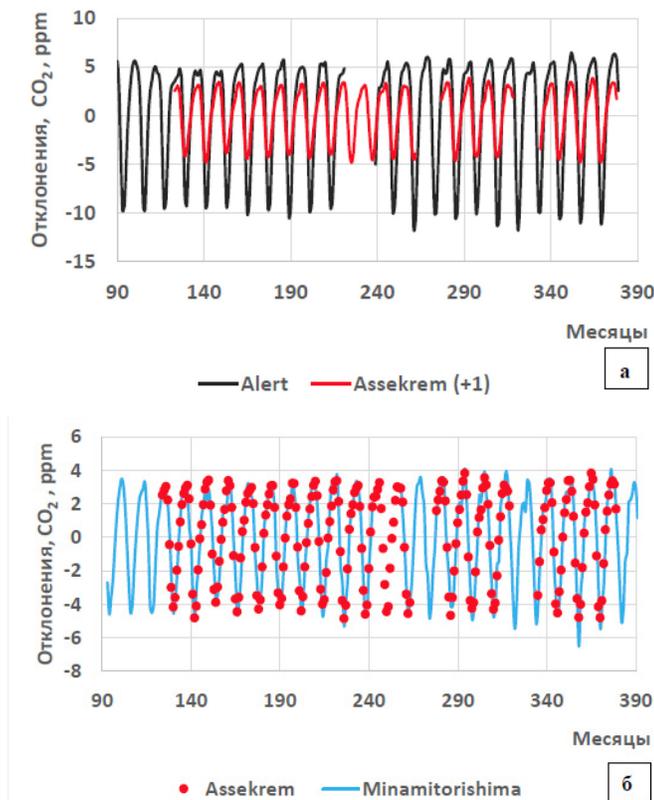


Рисунок 6. Ряды $\{C(n)\}$ для станций (а) Alert и Assekrem и (б) станций Assekrem и Minamitorishima;

на панели а) ряд для станции Assekrem сдвинут на 1 мес в сторону более ранних дат и обозначен в легенде Assekrem(+1)

Значительное число рассматриваемых станций не позволяет подобным образом сравнить попарно все станции в рамках статьи ограниченного объема. Поэтому ниже для каждой станции будут приведены две характеристики – среднеквадратическое значение ее ряда $\{C(n)\}$ и оптимальный сдвиг, причем обе – по отношению к «реперной» станции Alert (NOAA). Ее выбор условен.

На рис. 7 видно, что наибольшие среднеквадратические значения внутригодовых отклонений от многолетнего тренда наблюдаются в северо-восточной части Северной Америки и в Западной и Центральной Европе. На арктических станциях эти значения несколько больше, чем на самой северной станции Alert. Южнее параллели 45° с.ш. они становятся меньше значений на станции Alert и далее заметно убывают с широтой.

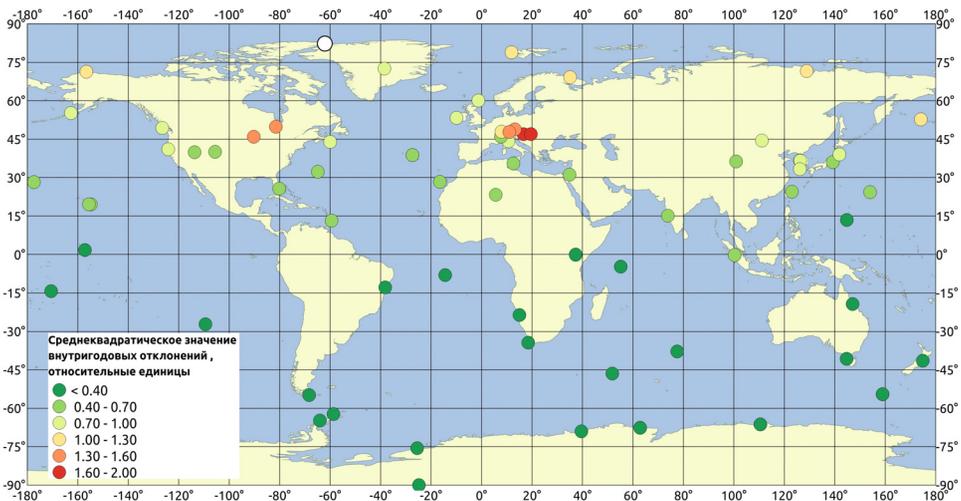


Рисунок 7. Среднеквадратическое значение внутригодовых отклонений содержания CO_2 в атмосфере от многолетнего тренда на различных станциях
 За единицу принято среднеквадратическое значение для станции Alert
 (обозначена белым кругом)

На рис. 8 представлены значения оптимального временного сдвига для разных станций по отношению к станции Alert – сдвиг ряда $\{C(n)\}$ для станции, при котором корреляция с рядом станции Alert максимальна. По сути этот сдвиг имеет сезонный характер, фенологическое происхождение. Он отражает, по-видимому, сезонные особенности разных точек географического пространства в отношении интенсивности процессов атмосферного переноса (как адвекции, так и вертикального перемешивания) и обмена CO_2 с подстилающей поверхностью. На большинстве внетропических станций Северного полушария эти внутригодовые колебания синфазны – временной сдвиг по отношению к станции Alert равен 0. Лишь на некоторых станциях на северо-востоке Северной Америки, в Западной и Центральной Европе и на юго-востоке Азии оптимальный сдвиг – в направлении более поздних дат на 1-2 мес. Далее, с убыванием широты наблюдается оптимальный сдвиг в направлении более ранних дат. Он, в целом, нарастает с убыванием широты.

При поиске значения оптимального сдвига на отрезке [-5; 6] в Южном полушарии для несколько станций получается отрицательный оптимальный временной сдвиг по отношению к станции Alert. Поправленные значения путем прибавления 12 мес. (имея в виду 12-месячную периодичность сезонных событий) приведены в правой колонке табл. 2.

Таблица 2. Оптимальный временной сдвиг для четырех станций Южного полушария и его скорректированные значения

Название станции	Широта, °	Долгота, °	Оптимальный сдвиг, мес.	Оптимальный сдвиг +12, мес.
South Pole	-90.00	-24.80	-5	7
Amsterdam Island	-37.80	77.54	-5	7
Cape Ferguson	-19.28	147.06	-4	8
Easter Island	-27.17	-109.42	-4	8

Скорректированные таким образом значения оптимального временного сдвига гармонизировали бы с положительными сдвигами на других станциях этих широт Южного полушария. Однако мы не стали вносить изменения цветов для этих станций на рис. 8.

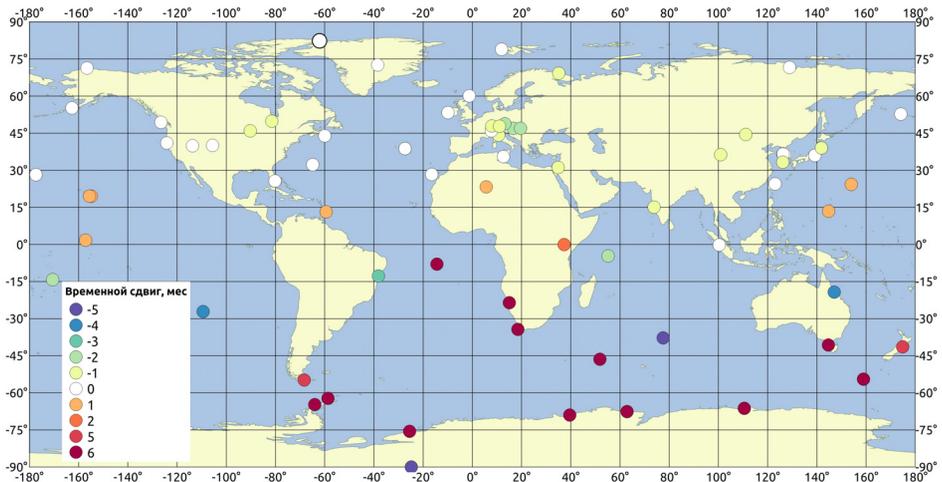


Рисунок 8. Оптимальный временной сдвиг (мес.) рядов внутригодовых (межмесячных) отклонений содержания CO₂ от многолетнего тренда для разных станций по отношению к станции Alert

Как уже обсуждалось выше при представлении рис. 6, ряды внутригодовых, межмесячных девиаций после применения соответствующих временных сдвигов могут демонстрировать высокие значения корреляции даже для станций, расположенных друг от друга на расстоянии тысяч километров. Попробуем охарактеризовать значения корреляций станционных рядов $\{C(n)\}$ после применения оптимальных временных сдвигов, которые, как уже говорилось выше, имеют сезонный характер. Для всех пар станций технически это визу-

лизировать невозможно – станций весьма много. Поэтому произведем кластеризацию, используя следующий алгоритм.

Начнем со станции, выбранной случайно. Далее будем случайно перебирать станции и, когда обнаружится станция с модулем оптимального сдвига не большим 1, прибавим ее к кластеру. Затем снова будем случайно перебирать оставшиеся станции и остановимся на той, у которой модуль оптимального сдвига по отношению к обеим уже выбранным не больше 1. Будем повторять эту операцию до тех пор, пока следующей станции, имеющей модуль оптимального сдвига по отношению ко всем, ранее выбранным, не больший 1, не найдется. Выбранные точки будем считать 1-м кластером. Его элементы из всей совокупности станций удалим. К совокупности оставшихся станций применим ту же процедуру образования кластера, причем начнем со случайно выбранной станции. Так образуем 2-й кластер. И так далее.

В результате получим разбиение всей начальной совокупности из N станций ($N = 75$) на кластеры, состоящие из n_1, n_2, \dots, n_M станций. Внутри каждого кластера модуль оптимального временного сдвига станционных рядов $\{C(n)\}$ для любой пары станций не превосходит 1, т.е. они «фенологически близки».

Результат кластеризации с помощью описанной процедуры – не однозначный, при ее повторении может измениться. Поэтому мы его повторили 30 000 раз и выбрали вариант разбиения на кластеры, который характеризуется минимумом энтропии:

$$H = - \sum_{m=1}^M \left(\frac{n_m}{N} \right) \ln \left(\frac{n_m}{N} \right).$$

Это соответствует представлению о наибольшем упорядочении разбиения. В рассматриваемом случае эта процедура кластеризации выявила 10 кластеров – см. рис. 9. Для них были вычислены межкластерные и внутрикластерные средние значения корреляций, обнаруженных при оптимальном временном сдвиге. При этом для внутрикластерных корреляций при расчетах учитывались только пары различных рядов. В табл. 3 приведены внутрикластерные и межкластерные средние значения корреляций для кластеров 1-5. Этим кластерам принадлежат почти 90% всех рассматриваемых станций. Из табл. 3 видно, что как внутрикластерные, так и межкластерные средние могут быть значительными – 0.8 и выше. Это указывает на сходство внутригодовых колебаний уровней содержания CO_2 в точках пространства, удаленных на значительные расстояния. Конечно, встречаются и более низкие значения, поскольку общие, глобальные факторы изменчивости могут маскироваться локальными и региональными факторами, специфическими для станций.



Рисунок 9. Результат кластеризации совокупности станций

Таблица 3. Внутрикластерные и межкластерные средние значения корреляций стационарных рядов внутригодовых отклонений уровней содержания CO_2 от многолетнего тренда для кластеров 1-5; значения округлены

Кластеры	1	2	3	4	5
1	0.90	0.80	0.71	0.85	0.87
2	0.80	0.71	0.68	0.78	0.78
3	0.71	0.68	0.82	0.76	0.74
4	0.85	0.78	0.76	0.95	0.89
5	0.87	0.78	0.74	0.89	0.89

Заключение

Проведенный эмпирический анализ временных рядов среднемесячных концентраций CO_2 для различных станций мониторинга показал их сходство. Несмотря на различия в абсолютных уровнях содержания CO_2 в приповерхностном слое атмосферы, многолетние тренды практически одинаковы на различных станциях. Эти тренды не линейные. Также, несмотря на различия в фазе и амплитуде внутригодовых, межмесячных отклонений от многолетних трендов, их корреляции часто высоки даже для станций, расположенных на значительном расстоянии друг от друга. При этом фазовые сдвиги, при которых наблюдаются максимальные значения корреляций, имеют сезонный характер. Как для абсолютных уровней содержания CO_2 , так и для среднеквадратических значений внутригодовых, сезонных отклонений, наибольшие значения, в основном, приурочены к регионам с развитой хозяйственной деятельностью.

В дальнейшем целесообразно провести аналогичный анализ для полей концентраций метана CH_4 и закиси азота N_2O , которые также входят в группу приоритетных парниковых газов – составляющих антропогенных выбросов. Мониторинг их содержания проводится на тех же станциях, что и для CO_2 .

По-видимому, в формировании особенностей поля концентрации CO_2 в приповерхностном слое атмосферы в месячном масштабе времени большую роль играют сезонные локальные и региональные процессы обмена с подстилающей поверхностью и процессы вертикального перемешивания, чем процессы горизонтального переноса. Однако исследование этого вопроса возможно лишь с помощью динамической атмосферной модели переноса. Эмпирического анализа здесь недостаточно.

Список литературы

Киотский протокол, 1997. Киотский протокол к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата. – Электронный ресурс. URL: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/kyoto.shtml.

Парижское соглашение. Организация Объединенных Наций. 2015, 32 с. – Электронный ресурс. URL: https://unfccc.int/sites/default/files/russian_paris_agreement.pdf.

РКИК ООН, 1992. Рамочная Конвенция Организации Объединенных Наций об изменении климата. 1992. – Организации Объединенных Наций, FCCC/INFORMAL/84 GE.05-62222 190705 280705, 30 с.

Семенов С.М. 2018а. 60 лет глобальному фоновому мониторингу уровня CO_2 в атмосфере. – Фундаментальная и прикладная климатология, № 1, с. 5-9, doi: 10.21513/2410-8758-2018-1-05-09.

Семенов С.М. 2018. Сходство современных изменений фоновых концентраций метана в приповерхностном слое атмосферы на различных широтах. – Фундаментальная и прикладная климатология, № 3, с. 82-95, doi: 10.21513/2410-8758-2018-3-82-95.

Семенов С.М., Ранькова Э.Я. 2018. Особенности многолетних изменений и сезонной изменчивости современных фоновых концентраций CO_2 , CH_4 и N_2O на станциях глобального мониторинга. – Фундаментальная и прикладная климатология, № 4, с. 71-87, doi: 10.21513/2410-8758-2018-4-71-87.

IPCC, 2018. Summary for Policymakers. – In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty /Masson-Delmotte V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Pïan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.). – Available at: <https://www.ipcc.ch/sr15/>.

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 $^{13}\text{CO}_2$ 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., Cerling T.E., Dearing M.D. – Springer Verlag, New York, pp. 83-113.

Le Quéré C., Andrew R.M., Friedlingstein P., Sitch S., Hauck J., Pongratz J., Pickers P.A., Korsbakken J.I., Peters G.P., Canadell J.G., Arneeth A., Arora V.K., Barbero L., Bastos A., Bopp L., Chevallier F., Chini L.P., Ciais P., Doney S.C., Gkritzalis T., Goll D.S., Harris I., Haverd V., Hoffman F.M., Hoppema M., Houghton R.A., Hurtt G., Ilyina T., Jain A.K., Johannessen T., Jones C.D., Kato E., Keeling R.F., Goldewijk K.K., Landschützer P., Lefèvre N., Lienert S., Liu Z., Lombardozi D., Metzl N., Munro D.R., Nabel J.E.M.S., Nakaoka S., Neill C., Olsen A., Ono T., Patra P., Peregon A., Peters W., Peylin P., Pfeil B., Pierrot D., Poulter B., Rehder G., Resplandy L., Robertson E., Rocher M., Rödenbeck C., Schuster U., Schwinger J., Séférian R., Skjelvan I., Steinhoff T., Sutton A., Tans P. P., Tian H., Tilbrook B., Tubiello F. N., van der Laan-Luijkx I.T., van der Werf G.R., Viovy N., Walker A.P., Wiltshire A.J., Wright R., Zaehle S., Zheng B. 2018. Global Carbon Budget 2018. – Earth Syst. Sci. Data, vol. 10, issue 4, pp. 2141-2194. – Available at: <https://doi.org/10.5194/essd-10-2141-2018/>.

The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2017. 2018. – WMO Greenhouse Gas Bulletin. World Meteorological Organization. Global AtmosphereWatch, 8 p. ISSN 2078-0796.

Статья поступила в редакцию: 06.11.2019 г.

CURRENT CARBON DIOXIDE CONTENT IN THE NEAR-SURFACE LAYER OF THE EARTH'S ATMOSPHERE: LONG-TERM TRENDS AND INTRA-ANNUAL VARIABILITY

S.M. Semenov^{1, 2, 3)}, V.V. Kuzovkin¹⁾*

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

²⁾ Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences,
29, Staromonetny lane, 109017, Moscow, Russian Federation

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

Abstract. Time series of monthly mean levels of carbon dioxide (CO₂) content in the near-surface atmosphere for the last 50 years are analyzed. The series are accessible at two open INTERNET resources: a website of the World Greenhouse Gas Data Center of the Global Atmosphere Watch (World Meteorological Organization) and a website of the Earth System Research Laboratory of the National Oceanic and Atmospheric Administration (USA). Eighty station time series are examined, of which 27 are from the global (background) stations, and the rest are from regional stations. Long-term changes are characterized by series of twelve-month running averages, while intra-annual (inter-monthly) variability are studied using differences of the initial series and the series characterizing long-term changes. The analysis of systematic differences showed that the highest levels of CO₂ are typical of the regions with developed economies located in North America, Western and Central Europe, and southeast Asia. Long-term changes (trends) at all stations coincide with global background changes. The intra-annual variability is of a regular seasonal nature. There is very high similarity (high correlation) of seasonal deviations from long-term trends at different points of geographical space if respective seasonal time shift is applied. Standard deviations of time series of intra-annual deviations are maximal in the regions with developed economies located in North America and Western and Central Europe. They are smaller in the high latitudes of the Northern Hemisphere, while in the Southern Hemisphere they are noticeably smaller and decrease with latitude.

Keywords. Carbon dioxide, data, monitoring, monthly means, long-term changes, intra-annual variability, global analysis.

References

Kiotskiy protokol [Kyoto Protocol]. 1997. *Kiotskiy protokol k Ramochnoy konventsii Organizatsii Ob'yedinennykh Natsiy ob izmenenii klimata* [Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change]. URL: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/kyoto.shtml.

Parizhskoye soglasheniye. Organizatsiya Ob'yedinennykh Natsiy [Paris agreement. United Nations]. 2015. 32 p. URL: https://unfccc.int/sites/default/files/russian_paris_agreement.pdf.

RKIK OON, 1992. *Ramochnaya Konventsiya Organizatsii Ob'yedinennykh Natsiy ob izmenenii klimata* [United Nations Framework Convention on Climate Change]. 1992. Organizatsiya ob'yedinennykh natsiy [The United Nations]. FCCC/INFORMAL/84 GE.05-62222 190705 280705, 30 p.

Semenov S.M. 2018a. 60 let global'nomu fonovomu monitoringu urovnya CO₂ v atmosphere [Sixty years of global monitoring of background atmospheric CO₂ concentrations]. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya – Fundamental and Applied Climatology*, no. 1, pp. 5-9, doi: 10.21513/2410-8758-2018-1-05-09.

Semenov S.M. 2018. Skhodstvo sovremennykh izmeneniy fonovykh kontsentratsiy metana v pripoverkhnostnom sloye atmosfery na razlichnykh shirotaktakh [Similarity of present-day variations in methane background concentrations in the surface layer of the atmosphere at different latitudes]. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya – Fundamental and Applied Climatology*, no. 3, pp. 82-95, doi: 10.21513/2410-8758-2018-3-82-95.

Semenov S.M., Ran'kova E. Ya. 2018. Osobennosti mnogoletnikh izmeneniy i sezonnoy izmenchivosti sovremennykh fonovykh kontsentratsiy CO₂, SN₄ i N₂O na stantsiyakh global'nogo monitoringa [The features of multiyear changes and seasonal variability of present-day background concentrations of CO₂, CH₄, and N₂O at the global monitoring stations]. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya – Fundamental and Applied Climatology*, no. 4, pp. 71-87, doi: 10.21513/2410-8758-2018-4-71-87.

IPCC, 2018. Summary for Policymakers. – In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty /Masson-Delmotte V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Pönn, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.). – Available at: <https://www.ipcc.ch/sr15/>.

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., Cerling T.E., Dearing M.D. – Springer Verlag, New York, pp. 83-113.

Le Quééré C., Andrew R.M., Friedlingstein P., Sitch S., Hauck J., Pongratz J., Pickers P.A., Korsbakken J.I., Peters G.P., Canadell J.G., Arneeth A., Arora V.K., Barbero L., Bastos A., Bopp L., Chevallier F., Chini L.P., Ciais P., Doney S.C.,

Gkritzalis T., Goll D.S., Harris I., Haverd V., Hoffman F.M., Hoppema M., Houghton R.A., Hurtt G., Ilyina., Jain A.K., Johannessen T., Jones C.D., Kato E., Keeling R.F., Goldewijk K.K., Landschützer P., Lefèvre N., Lienert S., Liu Z., Lombardozzi D., Metzl N., Munro D.R., Nabel J.E.M.S., Nakaoka S., Neill C., Olsen A., Ono T., Patra P., Peregon A., Peters W., Peylin P., Pfeil B., Pierrot D., Poulter B., Rehder G., Resplandy L., Robertson E., Rocher M., Rödenbeck C., Schuster U., Schwinger J., Séférian R., Skjelvan I., Steinhoff T., Sutton A., Tans P. P., Tian H., Tilbrook B., Tubiello F. N., van der Laan-Luijkx I.T., van der Werf G.R., Viovy N., Walker A.P., Wiltshire A.J., Wright R., Zaehle S., Zheng B. 2018. Global Carbon Budget 2018. – *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 10, issue 4, pp. 2141-2194. – Available at: <https://doi.org/10.5194/essd-10-2141-2018/>.

The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2017. 2018. – WMO Greenhouse Gas Bulletin. World Meteorological Organization. Global AtmosphereWatch, 8 p. ISSN 2078-0796.