



Всемирная  
Метеорологическая  
Организация  
Погода · Климат · Вода



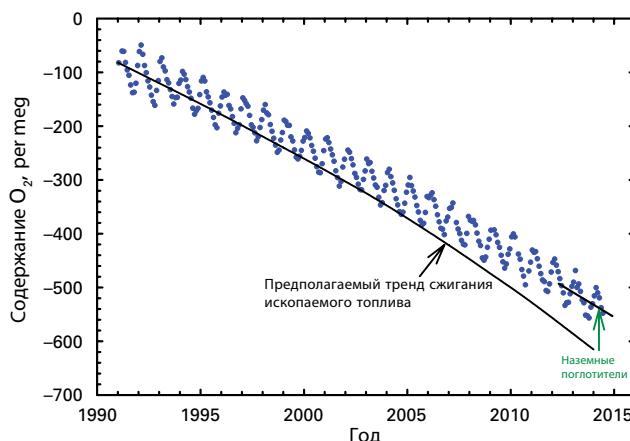
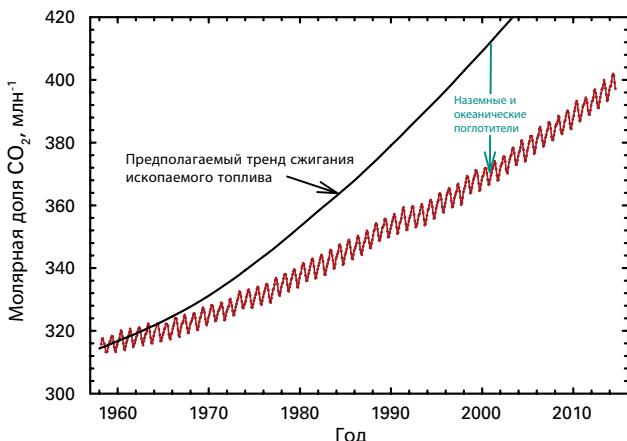
GLOBAL  
ATMOSPHERE  
WATCH

# БЮЛЛЕТЕНЬ ВМО ПО ПАРНИКОВЫМ ГАЗАМ

Содержание парниковых газов в атмосфере  
по данным глобальных наблюдений в 2013 г.

№ 10 | 6 ноября 2014 г.

ISSN 2078-0710



Измерения концентраций двуокиси углерода ( $\text{CO}_2$ ) и кислорода ( $\text{O}_2$ ) в атмосфере по-прежнему дают возможность для глубокого понимания причин отклонений в глобальном углеродном цикле, вызванных деятельностью человека. Повышение содержания атмосферного  $\text{CO}_2$  хорошо документировалось с 1958 г., когда под руководством Ч.Д. Килинга на Мауна-Лоа были начаты высокоточные измерения, показанные на левом рисунке. Практики, применяемые в то время для обеспечения высококачественных измерений, были приняты для проведения наблюдений участниками Глобальной службы атмосферы. Повышение концентрации  $\text{CO}_2$  составило лишь половину значения, ожидаемого в том случае, если бы в воздухе сохранился весь чрезмерный объем  $\text{CO}_2$ , образующегося в результате сжигания ископаемых видов топлива. Вторая половина была абсорбирована наземной биосферой и океанами, однако разделение показателей суши и океанов нелегко определить только на основе данных о  $\text{CO}_2$ . В данном случае полезными зарекомендовали себя измерения  $\text{O}_2$ .

На правом рисунке показан один из самых длинных временных рядов данных по  $\text{O}_2$ , пробы которого были

собраны в колбы на мысе Грин, Тасмания, и прошли анализ в Институте океанографии Скриппса. Данные о содержании  $\text{O}_2$  приводятся в виде относительных изменений в соотношении кислород/азот ( $\text{O}_2/\text{N}_2$ ). Уменьшение на 100 per meg<sup>[1]</sup> соответствует потере 100 молекул  $\text{O}_2$  на каждый миллион молекул  $\text{O}_2$  в атмосфере. Содержание  $\text{O}_2$  в атмосфере уменьшилось весьма незначительно по мере его поглощения при сжигании ископаемых видов топлива. Наблюданное сокращение концентрации  $\text{O}_2$  меньше предсказуемого по отношению к количеству сжигаемого топлива, поскольку  $\text{O}_2$  возвращается в атмосферу в результате поглощения  $\text{CO}_2$  растениями в процессе фотосинтеза. Компенсация  $\text{O}_2$  количественно определяет поэтому величину наземного поглощения  $\text{CO}_2$ . Соответственно, поглощение  $\text{CO}_2$  океанами может быть также рассчитано исходя из требования о том, что совокупные показатели поглощения равны итоговой величине, установленной по данным о  $\text{CO}_2$ . Данные о  $\text{O}_2$  также показывают колебания в сезонном и других временных масштабах, что дает дополнительную информацию о крупномасштабном функционировании биосферы Земли, которая дополняет данные о  $\text{CO}_2$ . (Графики любезно предоставлены Р. Килингом, Институт океанографии Скриппса, США)

## Резюме

Последний анализ данных наблюдений, полученных в рамках Программы Глобальной службы атмосферы (ГСА) ВМО, показывает, что глобальные усредненные молярные доли двуокиси углерода ( $\text{CO}_2$ ), метана ( $\text{CH}_4$ ) и зеэка азота ( $\text{N}_2\text{O}$ ) достигли в 2013 г. новых максимумов, причем для  $\text{CO}_2$  новый максимум составил

$396,0 \pm 0,1 \text{ млн}^{-1}$  [2], для  $\text{CH}_4$  —  $1824 \pm 2 \text{ млрд}^{-1}$  [3], а для  $\text{N}_2\text{O}$  —  $325,9 \pm 0,1 \text{ млрд}^{-1}$ . Эти значения составляют соответственно 142 %, 253 % и 121 % относительно доиндустриальных (до 1750 г.) уровней. С 2012 г. по 2013 г. увеличение атмосферного содержания  $\text{CO}_2$  составило  $2,9 \text{ млн}^{-1}$ , что представляет собой наибольшее межгодовое изменение за период с 1984 г. по 2013 г. Для  $\text{N}_2\text{O}$  увеличение с 2012 г. по 2013 г. было меньше

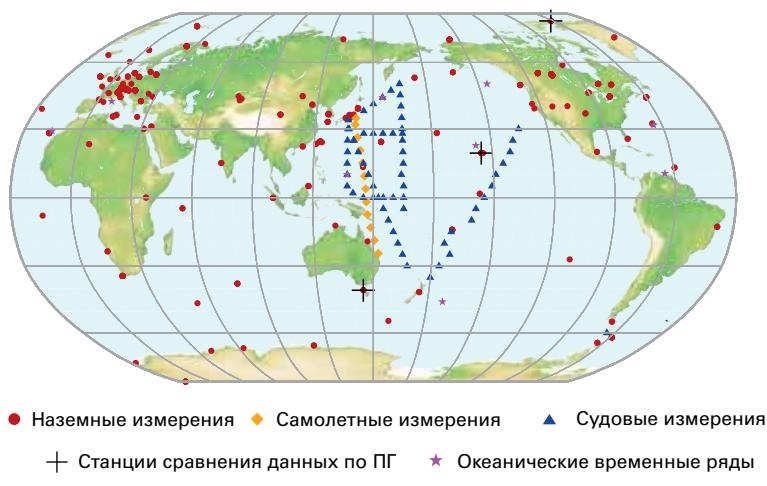


Рисунок 2. Глобальная сеть ГСА для мониторинга двуокиси углерода в последнее десятилетие. Существует аналогичная сеть для мониторинга метана. Показаны также характерные станции, где проводятся наблюдения за  $\text{CO}_2$  в океанской воде.

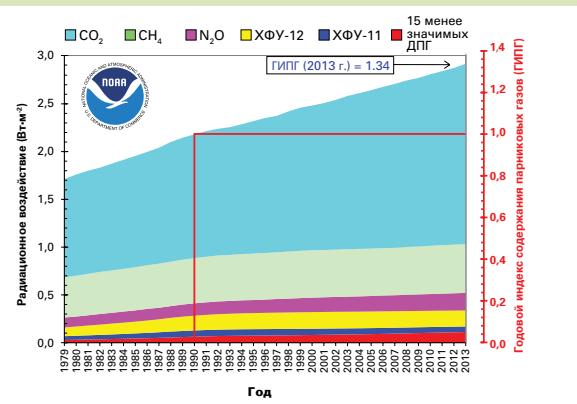


Рисунок 1. Радиационное воздействие всех ДПГ на атмосферу относительно 1750 г. и годовой индекс содержания парниковых газов (ГИПГ) НУОА за 2013 г.

Таблица 1. Глобальное среднегодовое содержание (2013 г.) и тренды важнейших парниковых газов по данным глобальной сети ГСА ВМО для мониторинга парниковых газов. Единицы измерения — молярные доли в сухом воздухе, а погрешности определены на уровне доверительного интервала, составляющего 68 %.

	$\text{CO}_2$	$\text{CH}_4$	$\text{N}_2\text{O}$
Глобальное содержание в 2013 г. <sup>[4]</sup>	$396,0 \pm 0,1$ млн $^{-1}$	$1824 \pm 2$ млрд $^{-1}$	$325,9 \pm 0,1$ млрд $^{-1}$
Содержание в 2013 г. относительно 1750 г. <sup>a</sup>	142 %	253 %	121 %
Абсолютное увеличение в 2012-2013 гг.	2,9 млн $^{-1}$	6 млрд $^{-1}$	0,8 млрд $^{-1}$
Относительное увеличение в 2012-2013 гг.	0,74 %	0,33 %	0,25 %
Среднее годовое абсолютное увеличение за последние 10 лет	2,07 млн $^{-1}/год$	3,8 млрд $^{-1}/год$	0,82 млрд $^{-1}/год$

<sup>a</sup> Исходя из предположения о том, что в доиндустриальный период молярная доля  $\text{CO}_2$  составляла 278 млн $^{-1}$ ,  $\text{CH}_4$  — 722 млрд $^{-1}$  и  $\text{N}_2\text{O}$  — 270 млрд $^{-1}$ . Число станций, данные которых были использованы при анализе, составляет 124 для  $\text{CO}_2$ , 121 для  $\text{CH}_4$  и 33 для  $\text{N}_2\text{O}$ . (В отличие от предыдущих бюллетеней использовалось уточненное значение доиндустриального уровня  $\text{CH}_4$ , что немного уменьшает радиационное воздействие и относительное увеличение содержания  $\text{CH}_4$  относительно 1750 г. Это не повлияло на ГИПГ).

наблюдавшегося между 2011 г. и 2012 г., но сравнимо со средними темпами роста за последние 10 лет. Содержание  $\text{CH}_4$  в атмосфере продолжало расти такими же темпами, что и в среднем за последние пять лет. Подготовленный Национальным управлением по исследованию океанов и атмосферы (НУОА) годовой индекс содержания парниковых газов показывает, что за период с 1990 г. по 2013 г. радиационное воздействие долгоживущих парниковых газов увеличилось на 34 %, при этом на  $\text{CO}_2$  приходится около 80 % этого увеличения. Поглощение антропогенного  $\text{CO}_2$  океаном привело к росту концентрации  $\text{CO}_2$  в морской воде и повышению ее уровня кислотности. По данным временных рядов измерений на нескольких характерных океанских станциях в течение последних двух десятилетий кислотность, выраженная в pH, уменьшалась на 0,0011 – 0,0024 единицы в год, а количество  $\text{CO}_2$ , растворенного в морской воде ( $p\text{CO}_2$ ) увеличивалось на 1,2 – 2,8 мкатм в год.

## Общая информация

В настоящем десятом ежегодном бюллетене ГСА/ВМО по парниковым газам представлены данные о содержании и темпах изменения важнейших долгоживущих парниковых газов — двуокиси углерода, метана, оксидов азота, и приводится краткая информация о вкладе в радиационное воздействие на атмосферу других газов. На эти три газа, вместе с XFY-12 и XFY-11, приходится приблизительно 96 %<sup>[5]</sup> радиационного воздействия на атмосферу, обусловленного ДПГ (рисунок 1). Впервые этот бюллетень содержит раздел о закислении океана, подготовленный в сотрудничестве с Международным координационным проектом по океаническому углероду (МКПОУ) Межправительственной океанографической комиссии Организации Объединенных Наций по вопросам образования, науки и культуры (МОК ЮНЕСКО), Научным комитетом по исследованию океана (СКОР) и Международным координационным центром по проблеме закисления океана (МКЦЗО) Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ).

Программа Глобальной службы атмосферы ВМО (<http://www.wmo.int/gaw>) координирует систематические наблюдения и анализ парниковых газов и других малых газовых составляющих. Станции, на которых в последнее десятилетие осуществляется мониторинг парниковых газов, показаны на рисунке 2. Эта карта включает несколько характерных станций, на которых производятся наблюдения  $\text{CO}_2$  в океанской воде. Данные измерений в атмосфере передаются участвующими институтами и архивируются и распространяются Мировым центром данных о парниковых газах (МЦДПГ), находящимся в Японском метеорологическом агентстве.

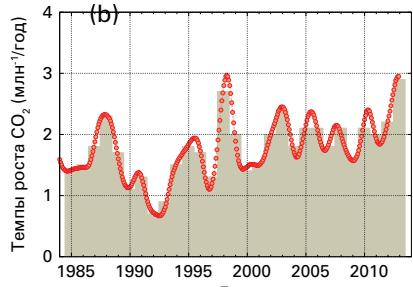
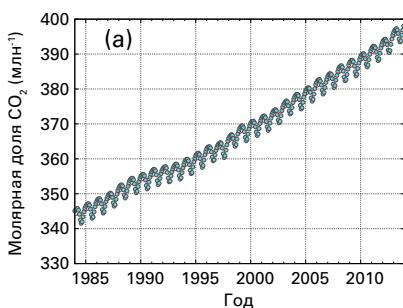


Рисунок 3. Глобально усредненная молярная доля  $\text{CO}_2$  (а) и темпы ее роста (б) в период с 1984 по 2013 гг. Разности последовательных среднегодовых значений показаны в виде затененных столбцов на графике (б).

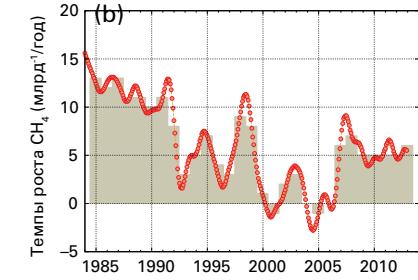
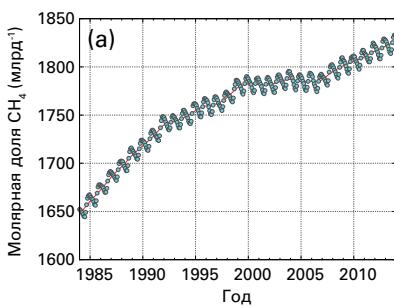


Рисунок 4. Глобально усредненная молярная доля  $\text{CH}_4$  (а) и темпы ее роста (б) в период с 1984 по 2013 гг. Разности последовательных среднегодовых значений показаны в виде затененных столбцов на графике (б).

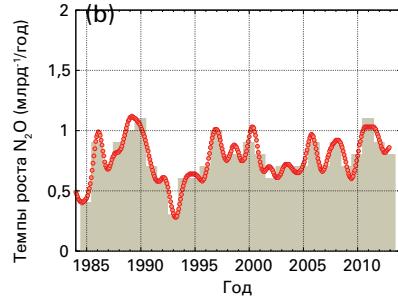
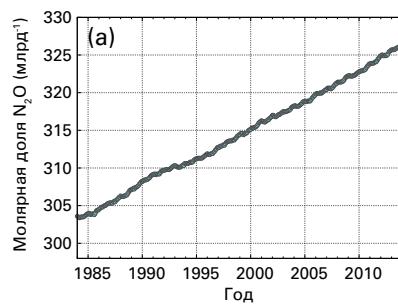


Рисунок 5. Глобальные средние значения молярной доли  $\text{N}_2\text{O}$  (а) и темпы ее роста (б) в период с 1984 по 2013 гг. Разности последовательных среднегодовых значений показаны в виде затененных столбцов на графике (б).

В таблице 1 приведены глобально усредненные значения содержания в атмосфере трех основных ДПГ в 2013 г. и изменения их содержания относительно 2012 и 1750 гг. Эти результаты получены посредством анализа рядов данных (ВМО, 2009 г.), отвечающих мировым эталонам ВМО. Данные с подвижных станций, за исключением судовых станций НУОА, с которых производится отбор проб воздуха в Тихоокеанском регионе, в этом глобальном анализе не используются.

Три парниковых газа, приведенных в таблице 1, тесно связаны с антропогенной деятельностью и сильно взаимодействуют с биосферой и океаном. Прогнозирование эволюции содержания в атмосфере парниковых газов требует количественной оценки их многочисленных источников, поглотителей и химических преобразований в атмосфере. Наблюдения ГСА предоставляют неоценимую информацию об ограничениях при расчете балансов этих или иных ДПГ и используются для оценки качества определения среднего содержания ДПГ в столбе атмосферы, определенного со спутника.

Годовой индекс парниковых газов НУОА в 2013 г. составлял 1,34, что представляет собой увеличение суммарного радиационного воздействия всех ДПГ на 34% (относительно 1750 г.) за период с 1990 г. и увеличение на 1,5% от 2012 к 2013 гг. (рисунок 1). Суммарное радиационное воздействие всех ДПГ в 2013 г. соответствует эквивалентной молярной доле  $\text{CO}_2$ , составляющей 479 млн<sup>-1</sup> (<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi>).

## Двукись углерода ( $\text{CO}_2$ )

Двукись углерода является единственным наиболее важным антропогенным парниковым газом в атмосфере с вкладом ~65% [5] в РВ всех ДПГ. Его вклад в увеличение радиационного воздействия за последние 10 лет составляет ~84%, а за последние пять лет — около 83%. Доиндустриальный уровень, составлявший около 278 млн<sup>-1</sup>, отражал баланс сравнительно больших

годовых разнонаправленных потоков между атмосферой и океаном (~80 ПгУ·год<sup>-1</sup>) и атмосферой и биосферой на суше (~120 ПгУ·год<sup>-1</sup>). В 2013 г. содержание  $\text{CO}_2$  в атмосфере достигло 142 % от доиндустриального уровня за счет прежде всего выбросов от сжигания ископаемых видов топлива и производства цемента (в 2012 г., согласно <http://www.globalcarbonproject.org>, выбросы  $\text{CO}_2$  составили 9,7 ± 0,5 ПгУ<sup>[6]</sup>). Этот вывод согласуется с данными ГСА о пространственном распределении содержания  $\text{CO}_2$  у поверхности Земли и темпах его роста, с уменьшением содержания кислорода ( $\text{O}_2$ ) в атмосфере и понижением изотопного отношения углерода,  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ , в  $\text{CO}_2$  в атмосфере. Незначительный вклад в увеличение  $\text{CO}_2$  вносит обезлесение и другие изменения в землепользовании (1,0 ± 0,5 ПгУ в 2012 г.), хотя результирующим воздействием наземной биосферы является сток. Среднее увеличение содержания  $\text{CO}_2$  в атмосфере с 2003 по 2013 гг. соответствует ~45 % объема  $\text{CO}_2$ , выброшенного в результате деятельности человека, а оставшиеся ~ 55 % удаляются за счет поглощения океанами и биосферой суши. Основной сток для выбросов  $\text{CO}_2$ , обусловленных сжиганием ископаемого топлива, создается океаном и биосферой суши. Информация о соотношении между этими видами стока основана на наблюдениях ГСА за  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$  в атмосфере. Следствием поглощения  $\text{CO}_2$  океанами является закисление океана (см. следующую страницу).

Глобальный средний уровень концентрации  $\text{CO}_2$  в 2013 г. составил 396,0 ± 0,1 млн<sup>-1</sup> (рисунок 3 (а)). Увеличение глобального среднего содержания  $\text{CO}_2$  с 2012 г. по 2013 г., равное 2,9 млн<sup>-1</sup>, превышает увеличение с 2011 г. по 2012 г., средние темпы роста в течение 1990-х гг. (~1,5 млн<sup>-1</sup> год<sup>-1</sup>) и в последнее десятилетие (~2,1 млн<sup>-1</sup> год<sup>-1</sup>). Произошедшее за последнее время увеличение выбросов  $\text{CO}_2$  от сжигания ископаемого топлива (~2 % год<sup>-1</sup> или ~0,2 ПгУ·год<sup>-1</sup>) не может объяснить ни межгодовую изменчивость темпов роста  $\text{CO}_2$ , ни большего, чем среднее, увеличения среднего годового значения от 2012 г. до 2013 г. Измерения  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  в атмосферной  $\text{CO}_2$  участниками ГСА указывают на то, что изменения темпов роста  $\text{CO}_2$  обусловлены небольшими



United Nations  
Educational, Scientific and  
Cultural Organization



Intergovernmental  
Oceanographic  
Commission



Ocean Acidification  
International  
Coordination Centre

OA-ICC



# ЗАКИСЛЕНИЕ ОКЕАНА

В настоящее время океан поглощает четверть антропогенных выбросов  $\text{CO}_2$ , уменьшая тем самым рост содержания  $\text{CO}_2$  в атмосфере, который мог бы иметь место в ином случае в результате сжигания ископаемого топлива. Увеличение поглощения  $\text{CO}_2$  океаном изменяет морскую карбонатную систему, которая контролирует кислотность морской воды. При растворении  $\text{CO}_2$  в морской воде образуется угольная кислота ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) – слабая кислота, которая диссоциирует на бикарбонаты ( $\text{HCO}_3^-$ ) и ионы водорода ( $\text{H}^+$ ). Повышенная концентрация  $\text{H}^+$  означает повышенную кислотность (пониженную pH). В условиях, когда океаны поглощают  $\sim 4$  кг  $\text{CO}_2$  в день на каждого человека, увеличение кислотности океана уже может быть измерено. Темпы закисления лимитируются присутствием карбонат-иона ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), который связывает большую часть вновь образуемых  $\text{H}^+$ , формируя бикарбонаты. Вместе с тем эта буферная реакция потребляет  $\text{CO}_3^{2-}$ , сокращая возможность поглощения большего количества  $\text{CO}_2$  приповерхностными слоями океана. В настоящее время потенциал поглощения составляет только 70 % от того, который имелся в начале индустриальной эпохи, и вполне может сократиться до 20 % к концу двадцать первого века. Как следует из палеографических прокси-данных, современные темпы закисления океана представляются беспрецедентными, по крайней мере, в течение последних 300 миллионов лет. В соответствии с проекциями, полученными по моделям системы Земля, процесс закисления будет продолжать ускоряться, по крайней мере, до середины века. Темпы закисления подвержены слабому воздействию изменения климата, но это воздействие составляет менее 10 % от изменений, вызванных увеличением  $\text{CO}_2$ . При этом опреснение, например за счет ускорения таяния льда в Арктике, может существенно увеличить темпы закисления.

В то время как химия закисления океана в целом хорошо изучена по данным наблюдений и моделей, вопрос о потенциальных последствиях закисления океана для морских организмов гораздо более сложен. Наибольшую озабоченность вызывает реакция организмов, подверженных процессу обызвесткования, таких как кораллы, водоросли, моллюски и некоторые виды planktona, поскольку их способность образовывать материал для раковины или скелета (посредством обызвесткования) зависит от содержания  $\text{CO}_3^{2-}$ . Для многих организмов при повышенной кислотности процессы известкования замедляются. Другие виды последствий закисления для морской биоты включают уменьшение выживаемости, замедление развития и темпов роста, а также изменение физиологических функций и уменьшение биоразнообразия.

Уменьшение pH в поверхностных слоях океана и увеличение на поверхности парциального давления  $\text{CO}_2$  ( $p\text{CO}_2$ ) за счет антропогенного углерода уже могут быть обнаружены. Эти тенденции были количественно оценены с помощью долговременных рядов наблюдений, которые предоставляют длительные, имеющие хорошее временное разрешение массивы данных, необходимые для описания изменений в биохимии и экосистемах океана. Примеры таких временных

рядов представлены на рисунке 6 и в таблице 2. Во всех точках (измерения длительностью более 10 лет)  $p\text{CO}_2$  на поверхности океана увеличивалась со временем за счет роста антропогенного  $\text{CO}_2$  и сопровождалось соответствующим закислением. Такие станции с рядами измерений, как правило, характеризуют обширные регионы от субполярных (MUNIDA, станция P и KNOT/K2) до субтропических (BATS, HOT, ESTOC, DYFAMED) и тропических (CARIACO, разрез вдоль меридiana  $137^\circ\text{в.д.}$ ). Помимо сезонных и межгодовых колебаний, имело место увеличение  $p\text{CO}_2$  с темпами 1,2 – 2,8 мкмат год $^{-1}$  (темперы увеличения молярной доли в атмосфере за последние 10 лет составляют в среднем  $2,1 \text{ млн}^{-1} \text{ год}^{-1}$ ), тогда как pH уменьшалась за период наблюдений со средней скоростью от  $-0,0011 \text{ год}^{-1}$  до  $-0,0024 \text{ год}^{-1}$ , в зависимости от места наблюдений. Темпы этих изменений зависят не только от химии, но также от других факторов, специфических для каждого региона. На станциях ESTOC, HOT и BATS темпы увеличения  $p\text{CO}_2$  на поверхности соответствуют росту  $p\text{CO}_2$  в атмосфере. Аналогичным образом, уменьшение pH было устойчивым и соответствовало темпам закисления, которые ожидались в условиях равновесия с атмосферой. В точке  $10^\circ\text{с.ш.}$  на разрезе вдоль меридiana  $137^\circ\text{в.д.}$  рост  $p\text{CO}_2$  и уменьшение pH были несколько меньшими, что потенциально связано с изменением циркуляции в субтропическом круговороте. Временной ряд на станции DYFAMED был подвержен изменениям циркуляции на фоне сильной сезонной изменчивости, что приводит к большим диапазонам ошибок на линейном тренде. На станции CARIACO  $p\text{CO}_2$  на поверхности было одним из самых высоких из измеренных, особенно в периоды апвеллинга вод, обогащенных  $\text{CO}_2$ . Большое увеличение  $p\text{CO}_2$  и уменьшение pH со временем в этом районе может быть отнесено за счет потепления поверхностных вод, связанного с ослаблением апвеллинга, что приводит к пониженной биологической продуктивности. Временные ряды наблюдений в субполярных районах обнаружили наиболее значительные экстремумы, частично вызванные большими сезонными различиями в температуре и биологической продуктивности. На станции MUNIDA темпы роста  $p\text{CO}_2$  на поверхности были малы, тогда как на станции KNOT/K2 рост  $p\text{CO}_2$  был таким же, как в атмосфере; однако уменьшение pH на станции KNOT/K2 было одним из самых больших. Отбор проб на станции P был не столь регулярным, но уменьшение pH и рост  $p\text{CO}_2$  следуют тем же тенденциям, что в других районах наблюдений.

Хотя здесь внимание сконцентрировано на результатах наблюдений на поверхности, большая часть водной толщи подвержена влиянию поглощения антропогенного углерода океаном и связанных с этим изменений в химии океана. К сожалению, в настоящее время имеется только несколько станций с временными рядами наблюдений, которые проводят измерения  $\text{CO}_2$ , и это создает значительные препятствия для количественной оценки трендов закисления океана и тенденций в химии карбонатов. Необходимо поддерживать и расширять наблюдения на станциях с временными рядами наблюдений вместе с судовыми измерениями в поверхностных и глубинных слоях океана.

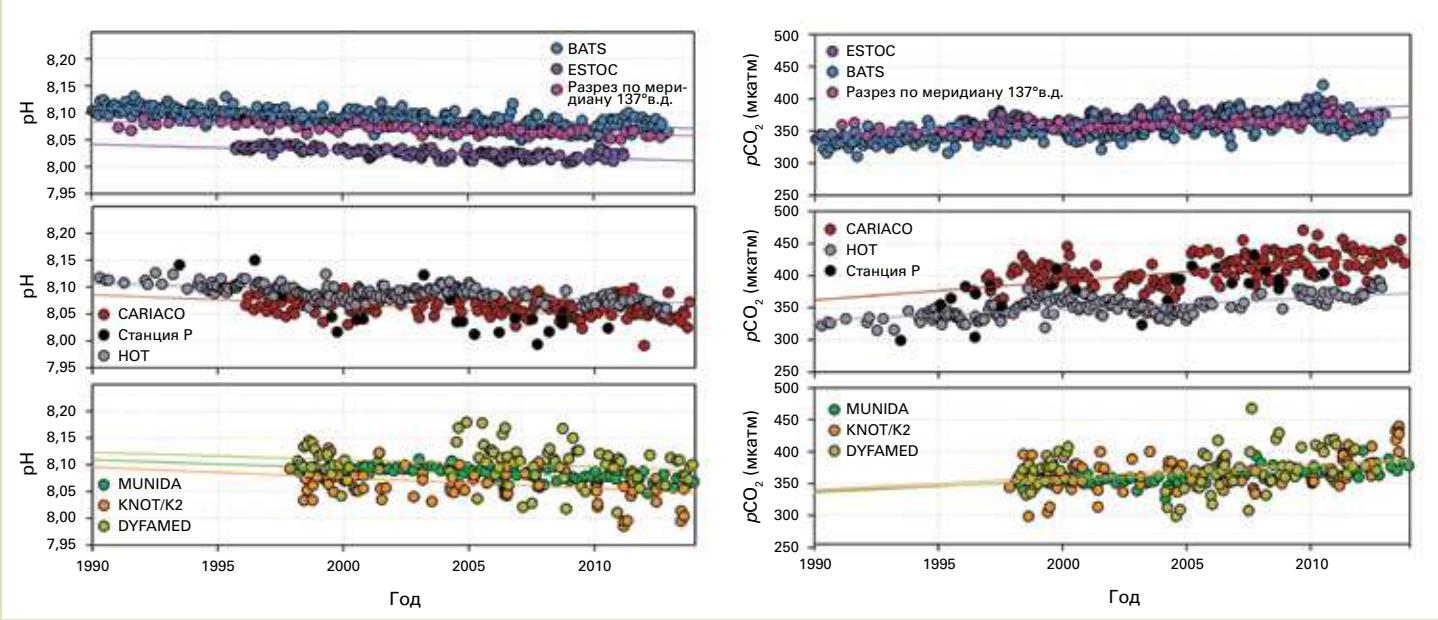


Рисунок 6. Временные ряды значений pH в поверхностных морских водах (после исключения сезонной изменчивости) и соответствующие линии трендов (вверху) и временные ряды значений  $p\text{CO}_2$  (мккатм) в поверхностных морских водах (после исключения сезонной изменчивости) и соответствующие линии трендов (внизу). Характерные временные ряды включают данные исследования временных рядов наблюдений в районе Бермуд в Атлантике (BATS; голубые точки), Европейской станции временных рядов наблюдений в океане около Канарских островов (ESTOC; фиолетовые точки), временных рядов наблюдений за океаном на Гавайях (HOT; серые точки), временных рядов на станциях CARIACO (красные точки), станции P (черные точки), Munida (зеленые точки), временных рядов наблюдений в северной части Тихого океана Киодо (KNOT; оранжевые точки), станции известной как динамика атмосферных потоков в Средиземном море (DYFAMED; желтые точки), станции в точке  $10^{\circ}\text{с.ш.}, 137^{\circ}\text{в.д.}$  вдоль линии многократных гидографических разрезов Японского метеорологического агентства по меридиану  $137^{\circ}\text{в.д.}$  (разрез по меридиану  $137^{\circ}\text{в.д.}$ , розовые точки). Расположение точек с характерными временными рядами наблюдений приведено на рисунке 2. Временное разрешение варьирует от ежемесячного до ежегодного.

Таблица 2. Линейные тренды и стандартные ошибки  $\text{pH}^a$  и  $p\text{CO}_2$  на поверхности для девяти характерных временных серий наблюдений за океаном

Временной ряд наблюдений	$\text{pH}$ ( $\text{год}^{-1}$ )	$p\text{CO}_2$ (мкватм·год $^{-1}$ )	Источник
BATS <sup>b</sup>	$-0,0017 \pm 0,0001$	$1,75 \pm 0,08$	Bates et al., 2014
ESTOC <sup>b</sup>	$-0,0014 \pm 0,0001$	$1,78 \pm 0,15$	Bates et al., 2014 González-Dávila et al., 2010
HOT <sup>b</sup>	$-0,0017 \pm 0,0001$	$1,89 \pm 0,15$	Bates et al., 2014 Dore et al., 2009
CARIACO <sup>b</sup>	$-0,0024 \pm 0,0003$	$2,79 \pm 0,37$	Bates et al., 2014 Astor et al., 2013
DYFAMED <sup>b</sup>	$-0,0019 \pm 0,0009$	$2,56 \pm 0,85$	Touratier and Goyet, 2011
MUNIDA <sup>b</sup>	$-0,0016 \pm 0,0003$	$1,55 \pm 0,24$	Bates et al., 2014 Currie et al., 2011
KNOT/K2 <sup>b</sup>	$-0,0024 \pm 0,0007$	$2,22 \pm 0,67$	Wakita et al., 2013
Станция P <sup>c</sup>	<sup>c</sup>	<sup>c</sup>	Wong et al., 2010
Точка $10^{\circ}\text{с.ш.}$ на разрезе по меридиану $137^{\circ}\text{в.д.}$ <sup>d</sup>	$-0,0011 \pm 0,0001$	$1,15 \pm 0,06$	Midorikawa et al., 2010

<sup>a</sup> pH по шкале суммарной концентрации иона водорода при температуре *in-situ*.

<sup>b</sup> Значения pH and  $p\text{CO}_2$  рассчитаны по данным измерения общего растворенного неорганического углерода, общей щелочности, температуры и солености (в предположении, что концентрации силикатов и фосфатов равны нулю), кроме случаев, когда имелись данные прямых измерений pH. Исключение сезонной изменчивости и расчет трендов производились согласно методике, изложенной в Отчете ГСА № 184.

<sup>c</sup> Для расчета линейного тренда на станции P имеется слишком мало данных.

<sup>d</sup> Значения pH рассчитаны на основе измерений  $p\text{CO}_2$  и общего растворенного неорганического углерода, температуры и солености.

изменениями потоков между атмосферой и биосферой суши. Как правило, ежегодно в обмен между атмосферой и биосферой суши вовлекаются  $\sim 120$  Гг углерода. Этим объясняется наблюдаемый годовой ход содержания  $\text{CO}_2$  в атмосфере в северном полушарии. Небольшая межгодовая изменчивость (1-2 %) этих потоков из-за изменения либо равновесия между фотосинтезом и дыханием, либо количества сгоревшей биомассы оказывает большое влияние на темпы роста содержания  $\text{CO}_2$  ( $\sim 4 \text{ ГгУ}\cdot\text{год}^{-1}$ ). Сейчас слишком рано говорить о том, какие факторы вызвали в 2012-2013 гг. превышение над средним уровнем темпов увеличения средних глобальных значений, однако эта область интенсивных исследований основывается на данных измерений участниками ГСА.

## Метан ( $\text{CH}_4$ )

Доля метана в радиационном воздействии ДПГ составляет  $\sim 17\%$  [5]. Приблизительно 40 % метана поступает в атмосферу из естественных источников (таких, как водно-болотные угодья и термитники) и приблизительно 60 % — из антропогенных источников (таких, как жизнедеятельность жвачных животных, выращивание риса, использование ископаемого топлива, захоронение отходов и сжигание биомассы). В результате увеличенных антропогенных выбросов содержание  $\text{CH}_4$  в атмосфере достигло в 2013 г. 253 % относительно доиндустриального уровня ( $\sim 722$  млрд $^{-1}$ ). Содержание  $\text{CH}_4$  увеличилось от  $\sim 1650$  млрд $^{-1}$  в начале 1980-х гг. до нового максимума в  $1824 \pm 2$  млрд $^{-1}$  в 2013 г. (рисунок 4 (а)). Темпы его роста (рисунок 4 (б)) сократились с  $\sim 13$  млрд $^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$  в начале 1980-х гг. до почти нуля в период 1999-2006 гг. На долгосрочные изменения темпов роста накладывается значительная межгодовая изменчивость (МГИ). Исследования МГИ помогают в понимании процессов, вносящих вклад в формирование источников и стоков  $\text{CH}_4$ . Начиная с 2007 г., содержание  $\text{CH}_4$  в атмосфере вновь увеличивается; с 2012 г. по 2013 г. его глобальное среднее значение увеличилось на 6 млрд $^{-1}$ . Исследования, основанные на данных измерений  $\text{CH}_4$  ГСА, указывают на то, что вероятной причиной является увеличение эмиссии  $\text{CH}_4$  из болот в тропиках и выбросов из антропогенных источников в умеренных широтах северного полушария. Как показано в Бюллетене ВМО по парниковым газам № 9, усиление эмиссии в Арктике не вносит вклад в продолжающийся рост содержания  $\text{CH}_4$  в атмосфере, начавшийся в 2007 г.

## Закись азота ( $\text{N}_2\text{O}$ )

Доля закиси азота в радиационном воздействии ДПГ составляет  $\sim 6\%$  [5]. Это третий наиболее важный ДПГ по своему вкладу в радиационное воздействие и характеризуется наибольшей эмиссией среди веществ, приводящих к истощению озонового слоя ( $\text{O}_3$ ), отнормированный на озоноразрушающий потенциал. До начала индустриализации содержание  $\text{N}_2\text{O}$  в атмосфере отражало баланс между его эмиссией из почв и океана и потерями при химических реакциях в стратосфере. В индустриальную эпоху дополнительные эмиссии связаны с использованием синтетических азотных удобрений (непосредственная эмиссия с сельскохозяйственных полей и опосредованная эмиссия от водотоков, подверженных воздействию сельскохозяйственных стоков), сжиганием ископаемого топлива и биомассы и другими менее значимыми процессами. В настоящее время антропогенные источники отвечают за  $\sim 40$  % всех выбросов; суммарно они составляют около 16 ТгА·год $^{-1}$  [7], как следует из измерений глобально усредненного содержания  $\text{N}_2\text{O}$  (рисунок 5 (а)) и темпов ее роста за последние годы (рисунок 5 (б)). Наибольший вклад в увеличение по отношению к доиндустриальной эпохе вносят синтетические азотные удобрения. Глобально усредненная молярная доля  $\text{N}_2\text{O}$  в 2013 г.

достигала  $325,9 \pm 0,1$  млрд $^{-1}$ , что на 0,8 млрд $^{-1}$  больше, чем в предыдущем году, и на 121 % больше доиндустриального уровня (270 млрд $^{-1}$ ). Рост среднегодовых значений с 2012 г. по 2013 г. сопоставим со средними темпами роста за прошедшие 10 лет (0,82 млрд $^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$ ).

Измерения  $\text{N}_2\text{O}$ , выполненные ГСА, использовались совместно с моделями переноса химических веществ в атмосфере для оценки выбросов на пространственных масштабах от региональных до континентальных. Последние исследования показали, что самыми крупными по площади источниками являются тропические и субтропические районы на суше (Thompson et al., 2014) и что выбросы  $\text{N}_2\text{O}$  в Азии имеют значительные тренды (Saikawa et al., 2014). Несмотря на эти достижения в понимании баланса  $\text{N}_2\text{O}$ , необходимо совершенствование совместимости измерений, выполняемых на сетях участников ГСА. Поскольку  $\text{N}_2\text{O}$  в атмосфере имеет большое время жизни (130 лет), пространственные градиенты невелики. Таким образом, для того, чтобы оценить выбросы по данным измерений с использованием моделей переноса, систематические различия между измерениями в рамках различных программ наблюдений должны быть небольшими,  $<0,1$  млрд $^{-1}$ , что труднодостижимо при использовании обычно применяемых технологий измерений.

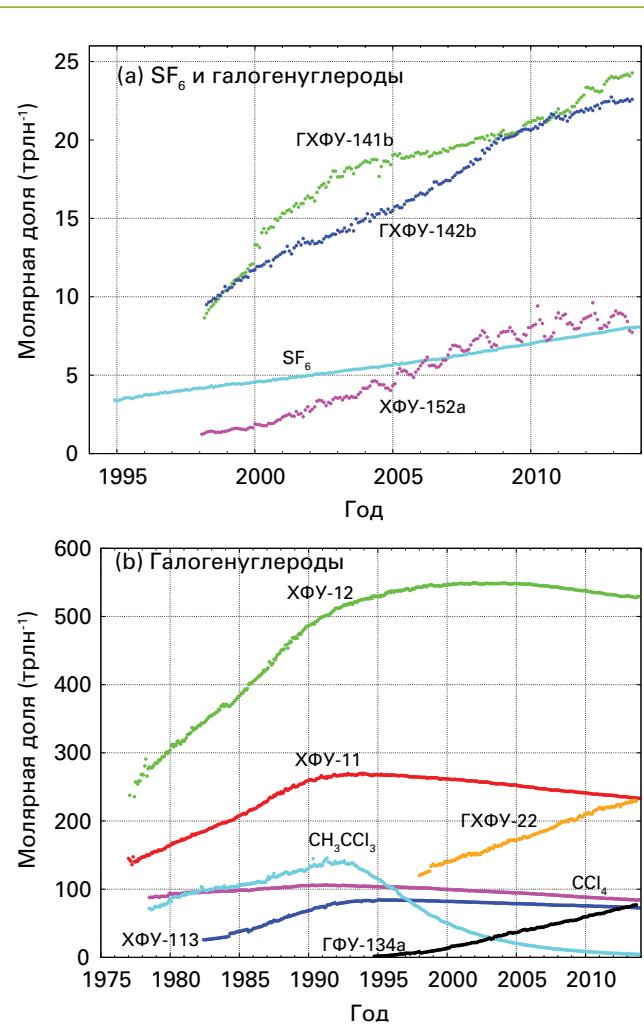


Рисунок 7. Среднемесячные значения молярных долей гексафторида серы ( $\text{SF}_6$ ) и совокупности галогеносодержащих соединений ( $\text{SF}_6$  и галогеноуглеродов с малой концентрацией (а) и галогеноуглеродов с высокой концентрацией (б)). Число станций, использованных в глобальном анализе, следующее:  $\text{SF}_6$  (23), ХФУ-11 (24), ХФУ-12 (25), ХФУ-113 (23),  $\text{CCl}_4$  (21),  $\text{CH}_3\text{CCl}_3$  (23), ГХФУ-141b (9), ГХФУ-142b (13), ГХФУ-22 (13), ГФУ-134a (9), ГФУ-152a (8).

## Другие парниковые газы

Гексафторид серы является сильным ДПГ. Его выбросы носят почти исключительно антропогенный характер, и он используется, главным образом, в качестве электрического изолятора в оборудовании распределения электроэнергии. В настоящее время его молярная доля примерно в два раза выше уровня, наблюдавшегося в середине 1990-х годов (рисунок 7 (а)). Время жизни  $SF_6$  в атмосфере очень велико, 3200 лет, таким образом, выбросы накапливаются в атмосфере и могут быть определены по темпам накопления, измеряемым участниками ГСА. Анализ данных наблюдений показывает, что выбросы, сведения о которых представляются в Рамочную конвенцию Организации Объединенных Наций об изменении климата, в большой степени занижены и не соответствуют результатам измерения в атмосфере (Levin et al., 2010). Полученные ГСА данные наблюдений за  $SF_6$  имеют еще одно важное применение: по ним проверяются показатели перемешивания в атмосфере, используемые в моделях переноса химических веществ, как это описано выше для  $N_2O$ .

Вклад озоноразрушающих хлорфторуглеродов (ХФУ) вместе с менее значимыми галогенированными газами в радиационное воздействие ДПГ составляет ~12%<sup>[5]</sup>. Хотя содержание ХФУ и большинства галонов сокращается, содержание в атмосфере гидрохлорфторуглеродов (ГХФУ) и гидрофторуглеродов (ГФУ), которые также являются активными парниковыми газами, увеличивается стремительными темпами, однако их содержание по-прежнему остается на низком уровне (на уровне трлн<sup>-1</sup><sup>[8]</sup>, рисунок 7 (а) и (б)).

В настоящем бюллетене рассматриваются, главным образом, ДПГ. Радиационное воздействие относительно короткоживущего тропосферного озона сопоставимо с радиационным воздействием галогенуглеродов. Многие другие загрязнители, такие как окись углерода, окислы азота и летучие органические соединения, хотя и не называются парниковыми газами, оказывают небольшое прямое или косвенное влияние на радиационное воздействие. Аэрозоли (взвешенные частицы) также являются короткоживущими веществами, которые изменяют радиационный баланс. В рамках Программы ГСА при поддержке со стороны стран — членов ВМО и сетей, предоставляющих данные, осуществляется мониторинг всех упомянутых здесь газов, а также аэрозолей.

## Распространение бюллетеней

Секретариат ВМО осуществляет подготовку и распространение настоящих бюллетеней в сотрудничестве с Мировым центром данных о парниковых газах, размещающимся в Японском метеорологическом агентстве, и Научной консультативной группой ГСА по парниковым газам при содействии со стороны Научной лаборатории НУОА по изучению системы Земля (ЕСРЛ). Бюллетени доступны на веб-сайтах Программы ГСА и МЦДПГ.

## Выражение благодарности и ссылки

Пятьдесят стран — членов ВМО предоставили данные о  $CO_2$  в МЦДПГ ГСА. Приблизительно 46 % данных измерений, передаваемых в МЦДПГ, собираются на станциях совместной сети ЕСРЛ НУОА по отбору проб воздуха. Для получения данных по другим сетям и станциям см. Отчет ГСА № 206 (доступен по адресу: <http://www.wmo.int/gaw>). В подготовку настоящего бюллетеня был также внесен вклад по линии Расширенного эксперимента по глобальным атмосферным газам (AGAGE) в виде предоставления данных наблюдений.

Кроме того, станции мониторинга ГСА, предоставившие данные для использования в настоящем бюллетене, отмечены на рисунке 2 и перечислены в списке станций, внесших вклад в подготовку бюллетеня, на веб-странице МЦДПГ (<http://ds.data.jma.go.jp/gmd/wdcgg/>). Они также описаны в Системе информации о станциях ГСА (СИСГСА) (<http://gaw.empa.ch/gawsis>), которая поддерживается МетеоСвис, Швейцария.

Резюме по проблеме закисления океана и трендах  $pCO_2$  в океане было подготовлено совместно Международным координационным проектом по океаническому углероду Межправительственной океанографической комиссии ЮНЕСКО, Научным комитетом по исследованию океана и Международным координационным центром по проблеме закисления океана Международного агентства по атомной энергии при поддержке ВМО. Особая благодарность выражается Ю. Астеру, Н. Байтсу, М. Черчу, Л. Коппола, К. Курье, М. Гонсалез-Давила, Х. Коиде, Л. Миллеру и М. Вакита за предоставление ими временных рядов данных и интерпретацию.

## Справочная литература

- Astor, Y.M., L. Lorenzoni, R. Thunell, R. Varela, F. Muller-Karger, L. Troccoli, G.T. Taylor, M.I. Scranton, E. Tappa and D. Rueda, 2013: Interannual variability in sea surface temperature and  $fCO_2$  changes in the Cariaco Basin. *Deep-Sea Res. II*, 93:33–43, doi:10.1016/j.dsr2.2013.01.002.
- Bates, N.R., Y.M. Astor, M.J. Church, K. Currie, J.E. Dore, M. González-Dávila, L. Lorenzoni, F. Muller-Karger, J. Olafsson and J.M. Santana-Casiano, 2014: A time-series view of changing ocean chemistry due to ocean uptake of anthropogenic  $CO_2$  and ocean acidification. *Oceanography*, 27(1):126–141, <http://dx.doi.org/10.5670/oceanog.2014.16>.
- Conway, T.J., P.P. Tans, L.S. Waterman, K.W. Thoning, D.R. Kitzis, K.A. Masarie and Ni Zhang, 1994: Evidence for interannual variability of the carbon cycle from the National Oceanic and Atmospheric Administration/Climate Monitoring and Diagnostics Laboratory global air sampling network. *J. Geophys. Res.*, 99(D11):22831–22855.
- Currie, K.I., M.R. Reid and K.A. Hunter, 2011: Interannual variability of carbon dioxide drawdown by subantarctic surface water near New Zealand. *Biogeochemistry*, 104(1–3):23–34, doi:10.1007/s10533-009-9355-3.
- Dore, J.E., R. Lukas, D.W. Sadler, M.J. Church and D.M. Karl, 2009: Physical and biogeochemical modulation of ocean acidification in the central North Pacific. *PNAS*, 106(30):12235–12240, doi:10.1073/pnas.0906044106.
- González-Dávila, M., J.M. Santana-Casiano, M.J. Rueda and O. Llinás, 2010: The water column distribution of carbonate system variables at the ESTOC site from 1995 to 2004. *Biogeosciences*, 7:3067–3081, doi:10.5194/bg-7-3067-2010.
- Levin, I., T. Naegler, R. Heinz, D. Osusko, E. Cuevas, A. Engel, J. Ilmberger, R.L. Langenfelds, B. Neininger, C. v. Rohden, L.P. Steele, R. Weller, D.E. Worthy, and S.A. Zimov, 2010: The global  $SF_6$  source inferred from long-term high precision atmospheric measurements and its comparison with emission inventories. *Atmos. Chem. Phys.*, 10(6):2655–2662, doi:10.5194/acp-10-2655-2010.
- Midorikawa, T., M.A. Ishii, S. Saito, D. Sasano, N. Kosugi, T. Motoi, H. Kamiya, A. Nakadate, K. Nemoto and H.Y. Inoue, 2010: Decreasing pH trend estimated from 25-yr time series of carbonate parameters in the western North Pacific. *Tellus B*, 62:649–659. Updated based on: [http://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/english/co2\\_trend/co2\\_trend\\_en.html](http://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/english/co2_trend/co2_trend_en.html); [http://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/english/oa/oceanacidification\\_en.html](http://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/english/oa/oceanacidification_en.html).
- Montzka, S.A., E.J. Dlugokencky and J.H. Butler, 2011: Non- $CO_2$  greenhouse gases and climate change. *Nature*, 476:43–50, doi:10.1038/nature10322.
- Saikawa, E., R.G. Prinn, E. Dlugokencky, K. Ishijima, G.S. Dutton, B.D. Hall, R. Langenfelds, Y. Tohjima,

T. Machida, M. Manizza, M. Rigby, S. O'Doherty, P.K. Patra, C.M. Harth, R.F. Weiss, P.B. Krummel, M. van der Schoot, P.J. Fraser, L.P. Steele, S. Aoki, T. Nakazawa, and J.W. Elkins, 2014: Global and regional emissions estimates for N<sub>2</sub>O. *Atmos. Chem. Phys.*, 14(9):4617–4641, doi:10.5194/acp-14-4617-2014.

Thompson, R.L., F. Chevallier, A.M. Crotwell, G. Dutton, R.L. Langenfelds, R.G. Prinn, R.F. Weiss, Y. Tohjima, T. Nakazawa, P.B. Krummel, L.P. Steele, P. Fraser, S. O'Doherty, K. Ishijima and S. Aoki, 2014: Nitrous oxide emissions 1999 to 2009 from a global atmospheric inversion. *Atmos. Chem. Phys.*, 14(4):1801–1817, doi:10.5194/acp-14-1801-2014.

Touratier, F. and C. Goyet, 2011: Impact of the Eastern Mediterranean Transient on the distribution of anthropogenic CO<sub>2</sub> and first estimate of acidification of the Mediterranean Sea. *Deep-Sea Research I*, 58(1):1–15, doi: 10.1016/j.dsr.2010.10.002.

Wakita, M., S. Watanabe, M. Honda, A. Nagano, K. Kimoto, K. Matsumoto, M. Kitamura, K. Sasaki, H. Kawakami, T. Fujiki, K. Sasaoka, Y. Nakano and A. Murata, 2013: Ocean acidification from 1997 to 2011 in the subarctic western North Pacific Ocean. *Biogeosciences*, 10:7817–7827, doi:10.5194/bg-10-7817-2013.

WMO, 2009: *Technical Report of Global Analysis Method for Major Greenhouse Gases by the World Data Centre for Greenhouse Gases* (Y. Tsutsumi, K. Mori, T. Hirahara, M. Ikegami and T.J. Conway). GAW Report No. 184 (WMO/TD-No. 1473), Geneva, 29 pp.

Wong, C.S., J.R. Christian, S.-K. Emmy Wong, J. Page, Liusen Xie and S. Johannessen, 2010: Carbon dioxide in surface seawater of the eastern North Pacific Ocean (Line P), 1973–2005. *Deep-Sea Res. I*, 57(5):687–695, doi:10.1016/j.dsr.2010.02.003.

## Контактная информация

### Всемирная Метеорологическая Организация

Отдел исследований атмосферной среды,  
Департамент научных исследований, Женева  
Э-пошта: AREP-MAIL@wmo.int

Веб-сайт: <http://www.wmo.int/gaw>

### Мировой центр данных о парниковых газах

Японское метеорологическое агентство, Токио  
Э-пошта: wdcgg@met.kishou.go.jp  
Веб-сайт: <http://ds.data.jma.go.jp/gmd/wdcgg>

- [1] Один ppmg соответствует 0,0001 % изменения в соотношении O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> в воздухе относительно стандартного соотношения.
- [2] млн<sup>-1</sup> = число молекул газа на миллион молекул сухого воздуха.
- [3] млрд<sup>-1</sup> = число молекул газа на миллиард (10<sup>9</sup>) молекул сухого воздуха.
- [4] Указанные диапазоны погрешности рассчитываются по методу бутстрэпа согласно Conway et al., 1994. Эта неопределенность рассчитывается с доверительным интервалом в 68 % (одна сигма).
- [5] Эта процентная доля рассчитывается как относительный вклад вышеупомянутого(ых) газа(ов) в повышение глобального радиационного воздействия, вызванного всеми долгоживущими парниковыми газами с 1750 г.
- [6] 1 PgY = 1 миллиард (10<sup>9</sup>) тонн или 10<sup>15</sup> г углерода.
- [7] TgN = тераграммы азота.
- [8] трлн<sup>-1</sup> = число молекул газа на триллион (10<sup>12</sup>) молекул сухого воздуха.

## Отдельные обсерватории, проводящие наблюдения за парниковыми газами



Австралийская станция исследования тропической атмосферы (АСИТА) в Ганн-Пойнте (12,25° ю.ш., 131,05° в.д., 25 м над уровнем моря) расположена около г. Дарвин на Северной Территории Австралии. Станция была основана в 2010 г., а в 2012 г. стала региональной станцией ГСА. Она находится рядом с исследовательским радиолокатором Бюро метеорологии (БМ), а ее работа обеспечивается совместно БМ и Организацией по научным и промышленным исследованиям для стран Содружества (КСИРО, Австралия). Ганн-Пойнт дополняет расширяющуюся сеть атмосферных наблюдений в Азиатско-Австралийском тропическом регионе и является важным дополнением к сети в наименее изученном тропическом регионе мира. В настоящее время программа измерений включает основные парниковые газы и малые газовые составляющие (измерения CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> и радона *in-situ*; программа отбора проб CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, окиси углерода (CO), водорода (H<sub>2</sub>), <sup>13</sup>CO<sub>2</sub>, <sup>18</sup>OCO с помощью колб), а также коэффициент аэрозольного рассеяния, сажу, озон, NO<sub>x</sub>, газообразную элементарную ртуть и короткоживущие галогеноуглероды, образующиеся на морских тропических побережьях. В недалеком будущем программы измерений будут расширены и будут включать измерения N<sub>2</sub>O, CO, концентрации частиц и летучие органические вещества *in-situ*.



**Фа Дин** (21,57° с.ш., 103,52° в.д., 1466 м над уровнем моря) является недавно назначенной региональной станцией ГСА. Она расположена в северо-западной части Вьетнама на холме над окружающими лесами. Работу станции обеспечивает Вьетнамская национальная гидрометеорологическая служба (НГМС). Площадка является метеорологической станцией с 2011 г., когда была построена вышка для размещения в будущем метеорологического радиолокатора. В лабораторном здании имеются площадки для лаборатории с кондиционированием воздуха, а также основные удобства для проживания персонала станции и командированных исследователей. Технические средства для проведения постоянных наблюдений парниковых газов и оптических характеристик аэрозоля были установлены НГМС в начале 2014 г. в рамках проекта по наращиванию потенциала и объединению систем наблюдений за климатом (КАТКОС) при поддержке двух швейцарских организаций (ЕМПА и Институт Пауля Шеррера). КАТКОС координируется Федеральным бюро метеорологии и климатологии МетеоСвис и финансируется Швейцарским агентством по развитию и сотрудничеству (ШРС). Содержание CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> и CO измеряется с помощью усиленной внутритривозонансной абсорбционной спектроскопии. Станция Фа Дин — первая, регистрирующая парниковые газы, земный озон и аэрозольные характеристики в сельской местности Вьетнама.