



Всемирная
Метеорологическая
Организация

Погода • Климат • Вода



GLOBAL
ATMOSPHERE
WATCH

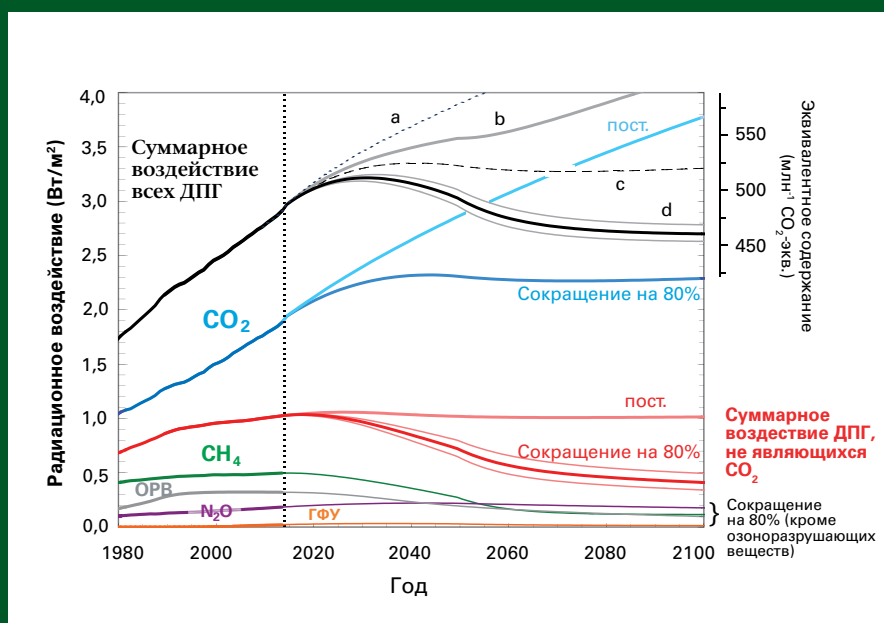
БЮЛЛЕТЕНЬ ВМО ПО ПАРНИКОВЫМ ГАЗАМ

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

№ 10 | 9 сентября 2014

Издание к Саммиту по климату

ISSN 2078-0710



Глобальная служба атмосферы ВМО (ГСА) координирует наблюдения за долгоживущими парниковыми газами (ДПГ), вносящими наибольший вклад в изменение климата. На рисунке представлено их радиационное воздействие (РВ) вместе с простой иллюстрацией будущего РВ при различных сценариях сокращения выбросов. Анализ данных наблюдений ГСА показывает, что сокращение современного уровня РВ (2,92 Вт·м⁻² в 2013г.)^[1] потребует существенного сокращения антропогенных выбросов всех основных парниковых газов (ПГ).

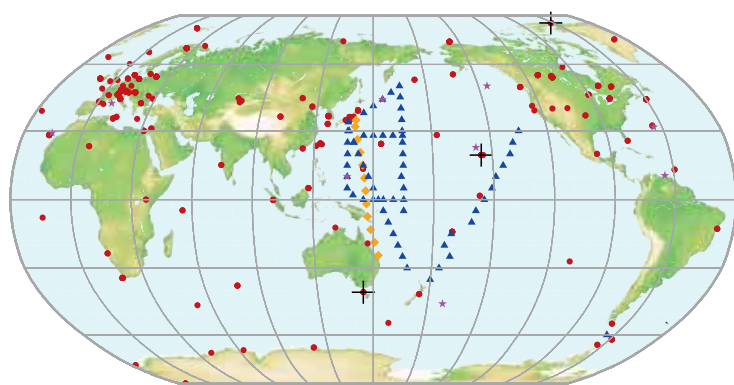
Долгоживущие ПГ (двуокись углерода (CO₂), метан (CH₄), закись азота (N₂O), озоноразрушающие вещества и остальные парниковые газы, указанные в Киотском протоколе к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата (гексафторид серы (SF₆), гидрофторуглероды (ГФУ) и перфторуглероды (ПФУ)) являются основными факторами изменения климата и ГСА ВМО проводит их мониторинг. Измерения этих газов в атмосфере, осуществляемые ГСА ВМО, используются для информационного обеспечения политики в области климата двумя путями: (1) данные наблюдений сравниваются с содержанием ДПГ в атмосфере в доиндустриальную эпоху (как правило, до 1750 г.), определенных из ледовых кернов для того, чтобы рассчитать РВ (определяемое как изменение радиационного баланса Земли) и (2) для газов, которые не подвержены быстрому обмену между атмосферой и океаном или биосферой, данные наблюдений дополняются оценками времени жизни с целью количественного определения их

выбросов. При построении приведенного выше рисунка использовались оба подхода. Он показывает превышение РВ доиндустриального уровня для основных ДПГ в период с 1980 г. по 2013 г. (см. графики данных и их описание в данном бюллетене) и их суммарное содержание (черный цвет) и показывает изменение в РВ, которое могло бы произойти в период 2014-2100 гг., исходя из следующих сценариев сокращения выбросов: (а) выбросы сохраняются постоянными на уровнях 2013 г., (b) выбросы CO₂ сохраняются постоянными и происходит сокращение антропогенных выбросов ПГ, не являющихся CO₂, на 80 %, (с) выбросы CO₂ сокращаются на 80 % в то время как выбросы ПГ, не являющихся CO₂, сохраняются постоянными и (d) выбросы всех ДПГ сокращаются на 80 %. Данные проекции не основаны на реалистичных сценариях выбросов; они лишь демонстрируют, что для уменьшения РВ потребуется значительное уменьшение антропогенных выбросов как ДПГ, отличных от CO₂, так и CO₂. Рисунок и описание основаны на уточненных данных, приведенных в Montzka et al., 2011.

Резюме

Последний анализ данных наблюдений, полученных в рамках Программы Глобальной службы атмосферы ВМО, показывает, что глобальные усредненные молярные доли CO₂, CH₄ и N₂O достигли в 2013 г. новых максимумов, причем для CO₂ новый максимум составил 396,0±0,1 млн⁻¹ [2], для CH₄ — 1824±2 млрд⁻¹ [3], а для

N₂O — 325,9±0,1 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 CO₂ составило 2,9 млн⁻¹, что представляет собой наибольшее межгодовое изменение за период с 1984 г. по 2013 г. Для N₂O увеличение с 2012 г. по 2013 г. было меньше наблюдавшегося между 2011 г. и 2012 г., но сравнимо



● Наземные измерения ◆ Самолетные измерения ▲ Судовые измерения
 + Станции сравнения данных по ПГ ☆ Океанические временные ряды

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 CO_2 в океанской воде.

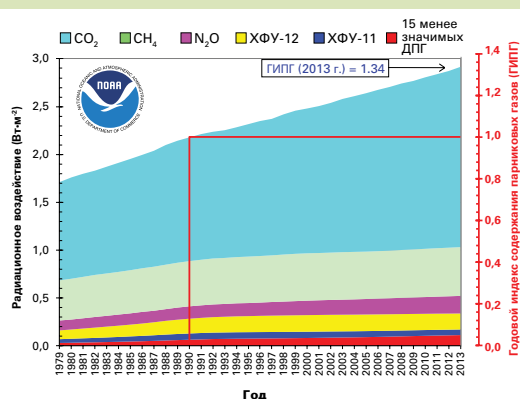


Рисунок 1. Радиационное воздействие всех ДПГ на атмосферу относительно 1750 г. и годовой индекс содержания парниковых газов (ГИПГ) НУОА за 2013 г.

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 %.

	CO_2	CH_4	N_2O
Глобальное содержание в 2013 г. ^[4]	$396,0 \pm 0,1$ млн ⁻¹	1824 ± 2 млрд ⁻¹	$325,9 \pm 0,1$ млрд ⁻¹
Содержание в 2013 г. относительно 1750 г. ^a	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

^a Исходя из предположения о том, что в доиндустриальный период молярная доля CO_2 составляла 278 млн⁻¹, CH_4 — 722 млрд⁻¹ и N_2O — 270 млрд⁻¹. Число станций, данные которых были использованы при анализе, составляет 124 для CO_2 , 121 для CH_4 и 33 для N_2O . (В отличие от предыдущих бюллетеней использовалось уточненное значение доиндустриального уровня CH_4 , что немного уменьшает радиационное воздействие и относительное увеличение содержания CH_4 относительно 1750 г. Это не повлияло на ГИПГ.)

со средними темпами роста за последние 10 лет. Содержание 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 CO_2 приходится около 80 % этого увеличения. Поглощение антропогенного CO_2 океаном привело к росту концентрации 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 CO_2 , растворенного в морской воде ($p\text{CO}_2$) увеличивалось на 1,2 – 2,8 мклатм 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 ХФУ-12 и ХФУ-11, приходится приблизительно 96 %^[5] 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 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.

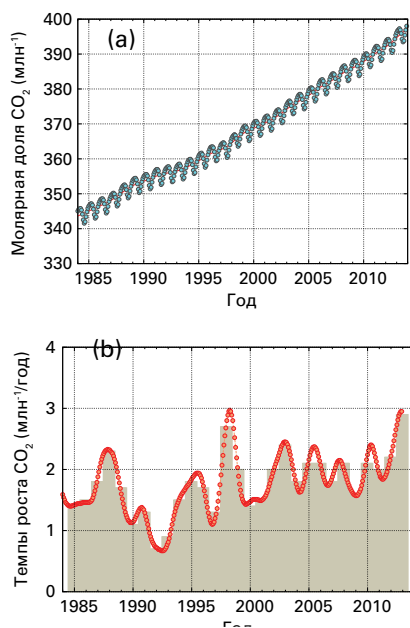


Рисунок 3. Глобально усредненная молярная доля CO_2 (a) и темпы ее роста (b) в период с 1984 по 2013 гг. Разности последовательных среднегодовых значений показаны в виде затененных столбцов на графике (b).

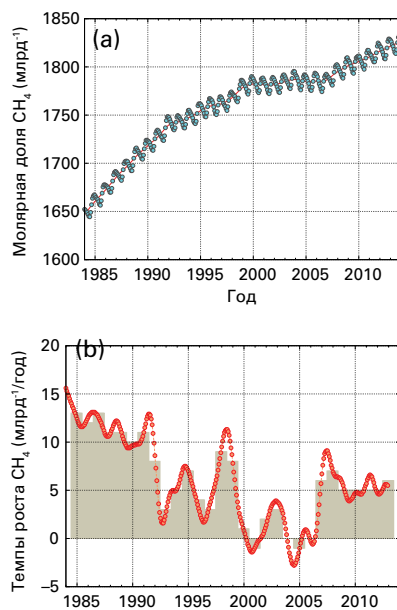


Рисунок 4. Глобально усредненная молярная доля CH_4 (a) и темпы ее роста (b) в период с 1984 по 2013 гг. Разности последовательных среднегодовых значений показаны в виде затененных столбцов на графике (b).

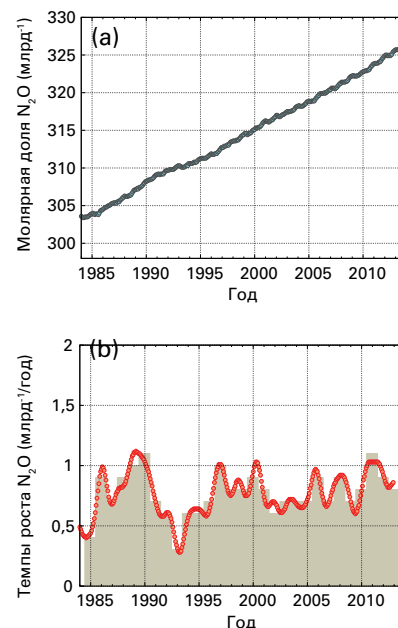


Рисунок 5. Глобальные средние значения молярной доли N_2O (a) и темпы ее роста (b) в период с 1984 по 2013 гг. Разности последовательных среднегодовых значений показаны в виде затененных столбцов на графике (b).

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 CO_2 , составляющей 479 млн⁻¹ (<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi>).

Двуокись углерода (CO_2)

Двуокись 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⁻¹, отражал баланс сравнительно больших

годовых разнонаправленных потоков между атмосферой и океаном (~80 ПгУ·год⁻¹) и атмосферой и биосферой на суше (~120 ПгУ·год⁻¹). В 2013 г. содержание 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 CO_2 составили 9,7±0,5 ПгУ^[6]). Этот вывод согласуется с данными ГСА о пространственном распределении содержания CO_2 у поверхности Земли и темпах его роста, с уменьшением содержания кислорода (O_2) в атмосфере и понижением изотопного отношения углерода, $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, в CO_2 в атмосфере. Незначительный вклад в увеличение 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 CO_2 в атмосфере с 2003 по 2013 гг. соответствует ~45 % объема CO_2 , выброшенного в результате деятельности человека, а оставшееся ~ 55 % удаляется за счет поглощения океанами и биосферой суши. Основной сток для выбросов CO_2 , обусловленных сжиганием ископаемого топлива, создается океаном и биосферой суши. Информация о соотношении между этими видами стока основана на наблюдениях ГСА за CO_2 и O_2 в атмосфере. Следствием поглощения CO_2 океанами является закисление океана (см. следующую страницу).

Глобальный средний уровень концентрации CO_2 в 2013 г. составил 396,0±0,1 млн⁻¹ (рисунок 3 (a)). Увеличение глобального среднего содержания CO_2 с 2012 г. по 2013 г., равное 2,9 млн⁻¹, превышает увеличение с 2011 г. по 2012 г., средние темпы роста в течение 1990-х гг. (~1,5 млн⁻¹ год⁻¹) и в последнее десятилетие (~2,1 млн⁻¹ год⁻¹). Произошедшее за последнее время увеличение выбросов CO_2 от сжигания ископаемого топлива (~2 % год⁻¹ или ~0,2 ПгУ·год⁻¹) не может объяснить ни межгодовую изменчивость темпов роста 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 CO_2 участниками ГСА указывают на то, что изменения темпов роста CO_2 обусловлены небольшими



Ocean Acidification
International
Coordination Centre
OA-ICC



ЗАКИСЛЕНИЕ ОКЕАНА

В настоящее время океан поглощает четверть антропогенных выбросов CO_2 , уменьшая тем самым рост содержания CO_2 в атмосфере, который мог бы иметь место в ином случае в результате сжигания ископаемого топлива. Увеличение поглощения CO_2 океаном изменяет морскую карбонатную систему, которая контролирует кислотность морской воды. При растворении CO_2 в морской воде образуется угольная кислота (H_2CO_3) – слабая кислота, которая диссоциирует на бикарбонаты (HCO_3^-) и ионы водорода (H^+). Повышенная концентрация H^+ означает повышенную кислотность (пониженную pH). В условиях, когда океаны поглощают ~4 кг CO_2 в день на каждого человека, увеличение кислотности океана уже может быть измерено. Темпы закисления лимитируются присутствием карбонат-иона (CO_3^{2-}), который связывает большую часть вновь образуемых H^+ , формируя бикарбонаты. Вместе с тем эта буферная реакция потребляет CO_3^{2-} , сокращая возможность поглощения большего количества 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 продолжаться ускоряться, по крайней мере, до середины века. Темпы закисления подвержены слабому воздействию изменения климата, но это воздействие составляет менее 10 % от изменений, вызванных увеличением 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 планктона, поскольку их способность образовывать материал для раковины или скелета (посредством обызвесткования) зависит от содержания 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 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 CO_2 и сопровождалась 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 меридиана 137° в.д.). Помимо сезонных и межгодовых колебаний, имело место увеличение $p\text{CO}_2$ с темпами 1,2 – 2,8 мкاتم год⁻¹ (темпы увеличения молярной доли в атмосфере за последние 10 лет составляют в среднем 2,1 млн⁻¹ год⁻¹), тогда как pH уменьшалась за период наблюдений со средней скоростью до -0,0011 год⁻¹ до -0,0024 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 ожидалось в условиях равновесия с атмосферой. В точке 10° с.ш. на разрезе вдоль меридиана 137° 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 большому диапазону 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 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 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.

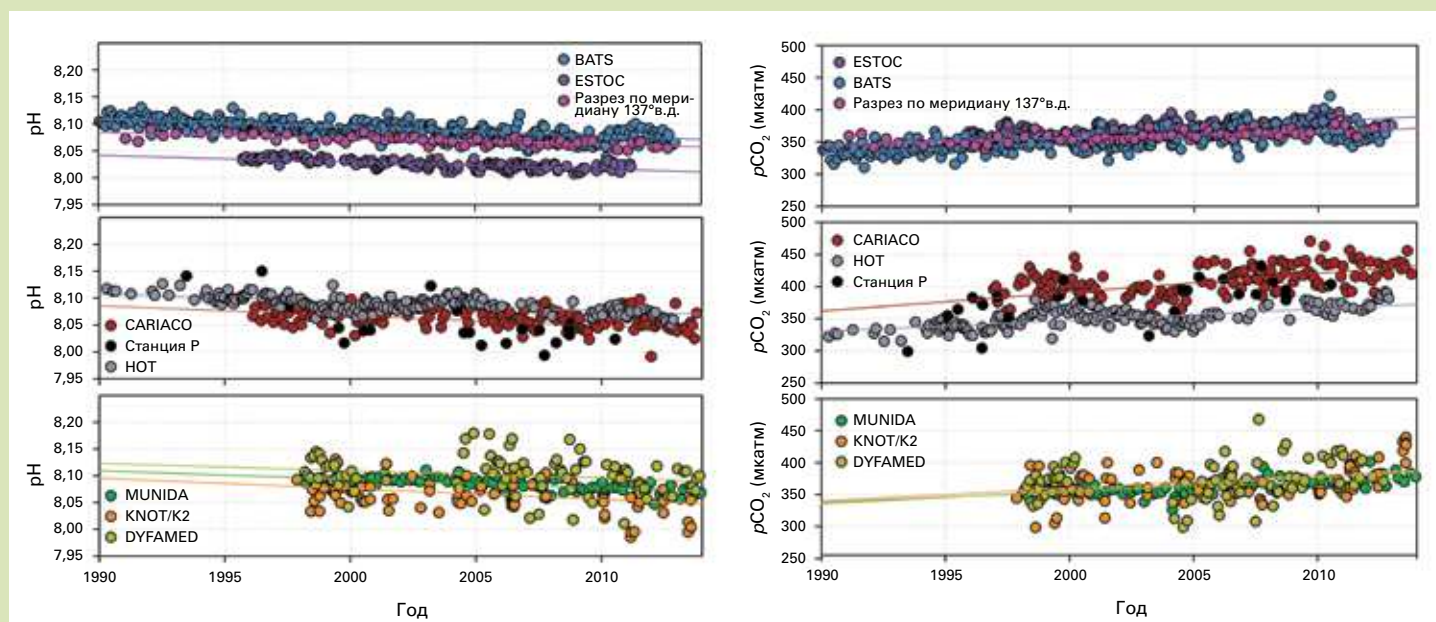


Рисунок 6. Временные ряды значений pH в поверхностных морских водах (после исключения сезонной изменчивости) и соответствующие линии трендов (вверху) и временные ряды значений $p\text{CO}_2$ (мклатм) в поверхностных морских водах (после исключения сезонной изменчивости) и соответствующие линии трендов (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 Р (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°с.ш. , 137°в.д. вдоль линии многократных гидрографических разрезов Японского метеорологического агентства по меридиану 137°в.д. (разрез по меридиану 137°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 pH^a и $p\text{CO}_2$ на поверхности для девяти характерных временных серий наблюдений за океаном

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

^a pH по шкале суммарной концентрации иона водорода при температуре *in-situ*.

^b Значения pH and $p\text{CO}_2$ рассчитаны по данным измерения общего растворенного неорганического углерода, общей щелочности, температуры и солёности (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.

^c Для расчета линейного тренда на станции Р имеется слишком мало данных.

^d Значения pH рассчитаны на основе измерений $p\text{CO}_2$ и общего растворенного неорганического углерода, температуры и солёности.

изменениями потоков между атмосферой и биосферой суши. Как правило, ежегодно в обмен между атмосферой и биосферой суши вовлекаются ~120 Пг углерода. Этим объясняется наблюдаемый годовой ход содержания 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 CO_2 (~4 ПгУ·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 (CH_4)

Доля метана в радиационном воздействии ДПГ составляет ~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 CH_4 в атмосфере достигло в 2013 г. 253 % относительно доиндустриального уровня (~722 млрд⁻¹). Содержание CH_4 увеличилось от ~1650 млрд⁻¹ в начале 1980-х гг. до нового максимума в 1824±2 млрд⁻¹ в 2013 г. (рисунок 4 (a)). Темпы его роста (рисунок 4 (b)) сократились с ~13 млрд⁻¹год⁻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 CH_4 . Начиная с 2007 г., содержание 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 CH_4 ГСА, указывают на то, что вероятной причиной является увеличение эмиссии 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 CH_4 в атмосфере, начавшийся в 2007 г.

Закись азота (N_2O)

Доля закись азота в радиационном воздействии ДПГ составляет ~6 % [5]. Это третий наиболее важный ДПГ по своему вкладу в радиационное воздействие и характеризируется наибольшей эмиссией среди веществ, приводящих к истощению озонового слоя (O_3), отнормированный на озоноразрушающий потенциал. До начала индустриализации содержание N_2O 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 ~40 % всех выбросов; суммарно они составляют около 16 ТгА·год⁻¹ [7], как следует из измерений глобально усредненного содержания N_2O (рисунок 5 (a)) и темпов ее роста за последние годы (рисунок 5 (b)). Наибольший вклад в увеличение по отношению к доиндустриальной эпохе вносят синтетические азотные удобрения. Глобально усредненная молярная доля N_2O в 2013 г.

достигала 325,9±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·год⁻¹).

Измерения N_2O , 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 N_2O в Азии имеют значительные тренды (Saikawa et al., 2014). Несмотря на эти достижения в понимании баланса N_2O , необходимо совершенствование совместности измерений, выполняемых на сетях участников ГСА. Поскольку N_2O 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.

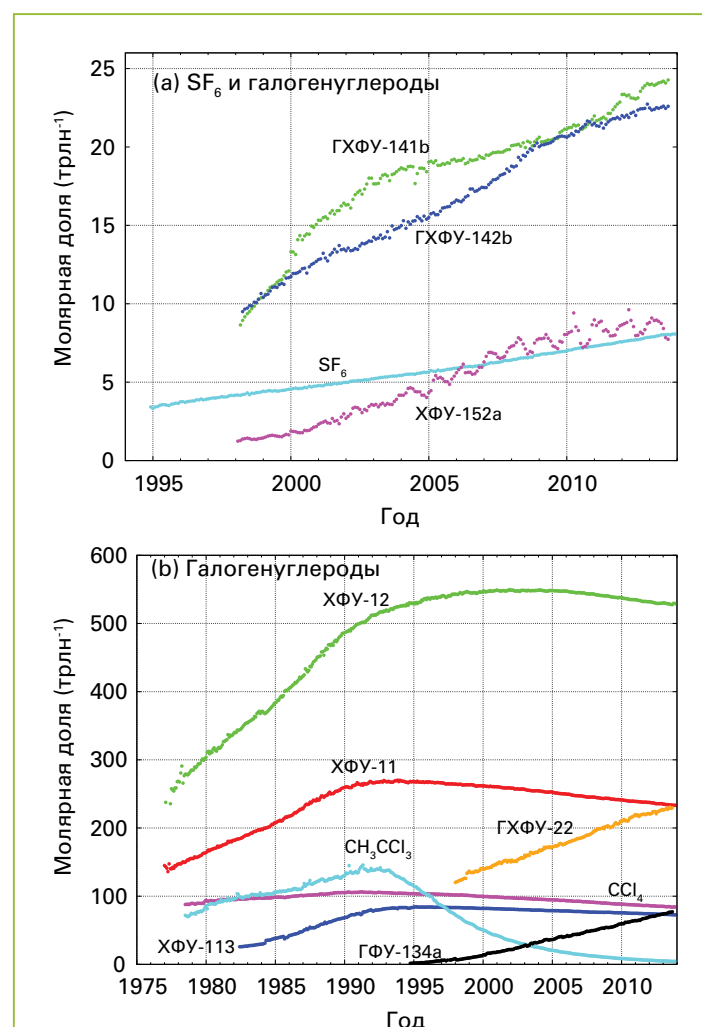


Рисунок 7. Среднемесячные значения молярных долей гексафторида серы (SF_6) и совокупности галогеносодержащих соединений (SF_6 и галогенуглеродов с малой концентрацией (a) и галогенуглеродов с высокой концентрацией (b)). Число станций, использованных в глобальном анализе, следующее: SF_6 (23), ХФУ-11 (24), ХФУ-12 (25), ХФУ-113 (23), CCl_4 (21), CH_3CCl_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 %^[5]. 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⁻¹ ^[8], рисунок 7 (а) и (b)).

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 глобальной 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 $p\text{CO}_2$ 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. Гонсалес-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 $f\text{CO}_2$ 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/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 N₂O. *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 CO₂ 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-почта: AREP-MAIL@wmo.int
Веб-сайт: <http://www.wmo.int/gaw>

Мировой центр данных о парниковых газах
Японское метеорологическое агентство, Токио
Э-почта: wdcgg@met.kishou.go.jp
Веб-сайт: <http://ds.data.jma.go.jp/gmd/wdcgg>

- [1] Вт·м⁻² = ватт на квадратный метр.
- [2] млн⁻¹ = число молекул газа на миллион молекул сухого воздуха.
- [3] млрд⁻¹ = число молекул газа на миллиард (10⁹) молекул сухого воздуха.
- [4] Указанные диапазоны погрешности рассчитываются по методу бутстреп 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 ПгУ = 1 миллиард (10⁹) тонн или 10¹⁵ г углерода.
- [7] ТгН = тераграммы азота.
- [8] трлн⁻¹ = число молекул газа на триллион (10¹²) 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 CO₂, CH₄ и радона *in-situ*; программа отбора проб CO₂, CH₄, N₂O, окиси углерода (CO), водорода (H₂), ¹³CO₂, ¹⁸OCO с помощью колб), а также коэффициент аэрозольного рассеяния, сажу, озон, NO_x, газообразную элементарную ртуть и короткоживущие галогеноуглероды, образующиеся на морских тропических побережьях. В недалеком будущем программы измерений будут расширены и будут включать измерения N₂O, 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. Площадка является метеорологической станцией с 2011 г., когда была построена вышка для размещения в будущем метеорологического радиолокатора. В лабораторном здании имеются площади 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 в начале 2014 г. в ходе сотрудничества швейцарских организаций (ЕМПА и институт Пауля Шеррара), Метеосвисс и Вьетнамской гидрометеорологической службы. Содержание CO₂, CH₄ и CO измеряется с помощью усиленной внутрирезонансной абсорбционной спектроскопии. Станция Фа Дин — первая, регистрирующая парниковые газы, приземный озон и аэрозольные характеристики в сельской местности Вьетнама.