



БЮЛЛЕТЕНЬ ВМО ПО ПАРНИКОВЫМ ГАЗАМ

Содержание парниковых газов в атмосфере по данным глобальных наблюдений в 2021 году

№ 18 | 26 октября 2022 года

ISSN 2078-0796

В 2020 и 2021 годах глобальная сеть программы Глобальной службы атмосферы (ГСА) ВМО зафиксировала наибольшие внутригодовые увеличения⁽¹⁾ (15 и 18 частей на миллиард⁽²⁾, соответственно) содержания метана в атмосфере (CH_4) с момента развертывания систематических измерений в начале 1980-х годов (рисунок 1). Научные специалисты в области парниковых газов во всем мире по-прежнему исследуют причины этого исключительного роста. Анализ результатов измерений содержания CH_4 в атмосфере и изотопного отношения стабильного углерода $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ (представляемого как $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$) (рисунок 2) показывает, что увеличение содержания CH_4 с 2007 года связано с биогенными процессами, но остается неясным, какой вклад в это увеличение вносят антропогенные источники, а какой — природные. Несмотря на то что необходимо приложить все возможные усилия для сокращения

выбросов CH_4 , это не заменяет сокращения выбросов CO_2 , влияние которых на климат будет сохраняться тысячелетиями.

Содержание CH_4 в атмосфере представляет собой второй по величине фактор изменения климата. Его эффективное прямое радиационное воздействие (ЭПРВ)⁽³⁾ составило $0,55 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ в 2021 году, увеличиваясь за последнее десятилетие в среднем на $0,003 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$. Кроме того, поскольку в результате распада CH_4 образуется тропосферный O_3 и стратосферный H_2O , в 2021 году косвенное радиационное воздействие вследствие CH_4 составило приблизительно $0,3 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$. (Для сравнения, в 2021 году ЭПРВ от CO_2 составило $2,22 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$, а за последнее десятилетие оно увеличивалось в среднем на $0,03 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}/\text{год}$.) Общий бюджет CH_4 складывается из сочетания разнообразных источников и поглотителей,

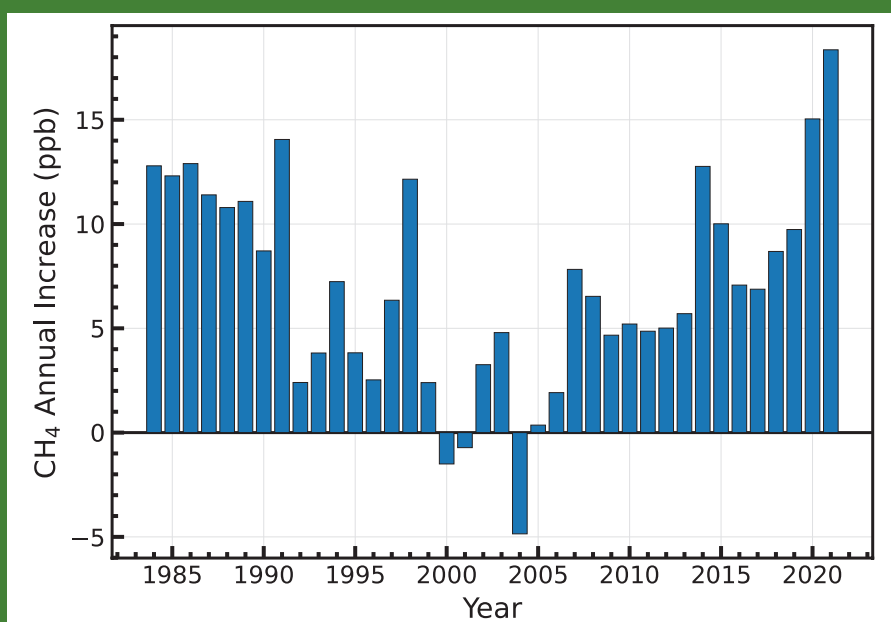


Рисунок 1. Внутригодовые увеличения⁽¹⁾ глобального среднего содержания CH_4 в атмосфере на основе измерений сети ГСА ВМО за период 1983–2021 гг.

причем многие источники перекрываются пространственно, что затрудняет количественную оценку выбросов по типам источников. В связи с этим сложно увязать изменения в скорости роста CH_4 с конкретными процессами. Лучшее всего общий объем CH_4 в атмосфере сейчас сдерживается за счет долгосрочных высококачественных наземных наблюдений за содержанием CH_4 и $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$, проводимых сообществом ГСА ВМО. Эти наблюдения убедительно показывают, что:

- с 2007 года среднее глобальное значение содержания CH_4 в атмосфере увеличивается;
- темпы его роста ускоряются;
- ежегодные увеличения в 2020 и 2021 годах стали самыми крупными с момента начала систематических наблюдений в 1983 году.

Измерения распространенности изотопа показывают, что усредненный по всему миру $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$ начал снижаться после примерно 200 лет роста почти одновременно с началом роста содержания CH_4 в атмосфере после периода почти нулевого роста. Хотя для объяснения возобновления этого роста в 2007 году было предложено множество сценариев изменения источников и поглотителей, наиболее вероятная версия, согласующаяся с наблюдениями ГСА за CH_4 и $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$, заключается в том, что это связано

с увеличением выбросов из преимущественно биогенных источников. Пока нельзя сказать, происходит ли это отчасти из-за увеличения выбросов из естественных водно-болотных угодий как обратной климатической связи. Рекордное увеличение в 2020 и 2021 годах также может быть связано с межгодовой изменчивостью, наложенной на долгосрочное увеличение выбросов. Понимание этих изменений по-прежнему представляет собой важный вопрос для научного сообщества.

Существуют экономически эффективные стратегии по снижению антропогенных выбросов CH_4 , особенно в секторе ископаемого топлива, который, как известно, является крупным источником CH_4 (на него приходится более 20 % от общего объема глобальных выбросов), и снижение этих выбросов может обеспечить дополнительные преимущества в виде снижения выбросов CO_2 . Эти стратегии следует активно применять. Вместе с тем, хотя накопление метана в атмосфере обратимо благодаря относительно короткому времени жизни метана (около 9 лет), мы также должны предпринимать шаги по сокращению выбросов CO_2 . Накопление CO_2 в атмосфере является необратимым в масштабах человеческого времени и будет влиять на климат в течение тысячелетий, активируя сильные и медленные обратные связи, такие как потеря полярного льда и повышение уровня моря.

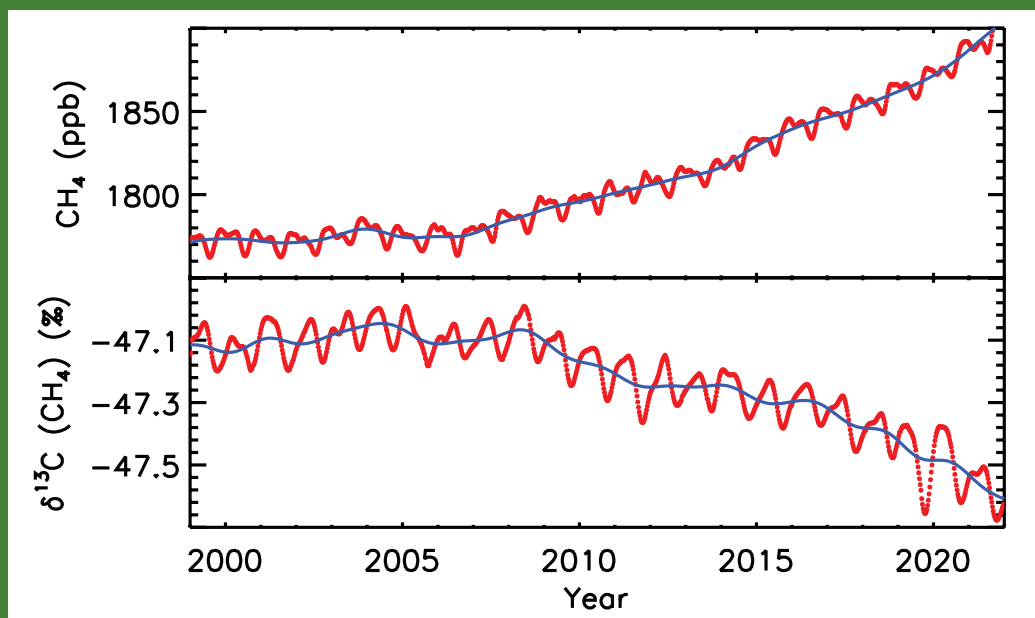


Рисунок 2. Сглаженные (красные линии) и с исключением сезонной составляющей (синие линии) глобальные средние значения содержания CH_4 и $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$ в атмосфере на основе измерений глобальной сети ГСА ВМО

Резюме

Последний анализ данных наблюдений, полученных на сети наблюдений *in situ* ГСА ВМО, показывает, что глобально усредненные приземные молярные доли⁽⁴⁾ для диоксида углерода (CO₂), метана (CH₄) и закиси азота (N₂O) выросли в 2021 году до новых максимумов, достигнув для CO₂ 415,7 ± 0,2 млн⁻¹⁽⁵⁾, для CH₄ — 1908 ± 2 млрд⁻¹, а для N₂O — 334,5 ± 0,1 млрд⁻¹. Эти значения составляют соответственно 149 %, 262 % и 124 % по отношению к доиндустриальным уровням (до 1750 года). Увеличение содержания CO₂ в атмосфере с 2020 по 2021 год было таким же, как и увеличение, наблюдавшееся с 2019 по 2020 год, и более значительным, чем среднегодовые темпы роста, наблюдавшиеся за последнее десятилетие. Что касается CH₄, его содержание увеличилось с 2020 по 2021 год более значительно, чем за период с 2019 по 2020 год, и данное увеличение существенно превысило среднегодовые темпы роста за последнее десятилетие. Содержание N₂O немного увеличилось с 2020 по 2021 год по сравнению с периодом с 2019 по 2020 год и также было выше среднегодовых темпов роста за последнее десятилетие. Годовой индекс содержания парниковых газов (ГИПГ) [1] Национального управления по исследованию океанов и атмосферы (НУОА) показывает, что в период с 1990 по 2021 год радиационное воздействие долгоживущих парниковых газов (ДПГ) увеличилось на 49 %, при этом на CO₂ приходится около 80 % этого увеличения.

Обзор наблюдений сети ГСА *in situ* за 2020 год

В настоящем восемнадцатом Бюллетене ВМО по парниковым газам сообщается о содержании в атмосфере важнейших ДПГ — двуокиси углерода, метана и закиси азота и о темпах изменения их содержания, а также приводится краткая информация о вкладе в радиационное воздействие на атмосферу других парниковых газов. На CO₂, CH₄ и N₂O, наряду с дихлордиформметаном ХФУ-12 и трихлорфторметаном ХФУ-11, приходится приблизительно 96 %⁽⁶⁾ [1] радиационного воздействия, обусловленного ДПГ (рисунок 3).

Программа Глобальной службы атмосферы ВМО координирует систематические наблюдения и анализы парниковых газов (ПГ) и других малых газовых составляющих. Станции, на которых осуществляется измерение ПГ в последнее десятилетие, показаны на рисунке 4. Данные измерений сообщаются участвующими странами, архивируются и распространяются Мировым центром данных по парниковым газам (МЦДПГ) ВМО, размещенным в Японском метеорологическом агентстве.

Представленные здесь результаты МЦДПГ ВМО по глобальному среднему значению и темпам роста несколько отличаются от результатов, сообщаемых НУОА за те же годы (см. [2] и обложку данного бюллетеня), по причине различий в используемых

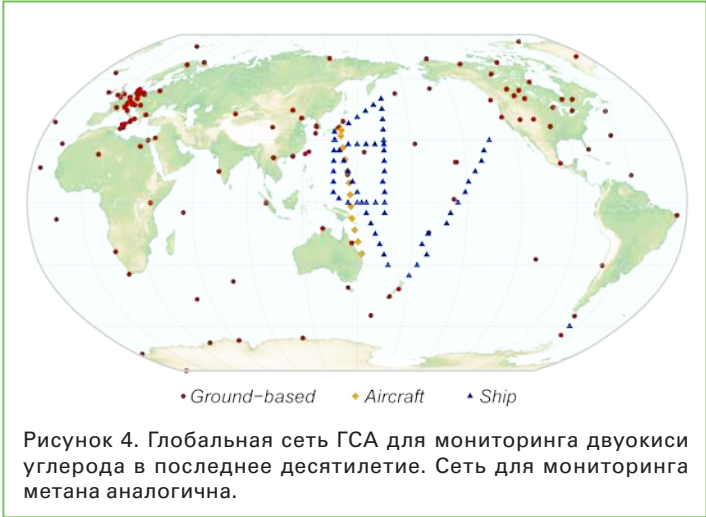


Рисунок 4. Глобальная сеть ГСА для мониторинга двуокиси углерода в последнее десятилетие. Сеть для мониторинга метана аналогична.

станциях, различий в процедуре усреднения и небольших различий в периоде времени, для которого эти значения репрезентативны. МЦДПГ ВМО следует процедуре, описанной в Отчете ГСА № 184 [3]. Представленные здесь результаты, касающиеся CO₂, несколько отличаются от описанных в Бюллетенях по парниковым газам, выпущенных до 2020 года (примерно на 0,2 млн⁻¹), поскольку теперь данные передаются с использованием новой шкалы калибровки WMO-CO₂-X2019 [4]. Исторические данные были переведены в новую шкалу для обеспечения согласованности представленных тенденций.

В таблице приведены глобально усредненное атмосферное содержание трех основных ДПГ в 2021 году и изменения в их содержании с 2020 и 1750 годов. Данные с подвижных станций (синие треугольники и оранжевые ромбы на рисунке 4), за исключением станций НУОА, с которых производится отбор проб в восточной части Тихоокеанского региона, в этом глобальном анализе не используются.

Три ПГ, приведенные в таблице, тесно связаны с антропогенной деятельностью и активно взаимодействуют с биосферой и океанами. Прогнозирование эволюции содержания ПГ в атмосфере требует количественной оценки их многочисленных источников, поглотителей и химических преобразований в

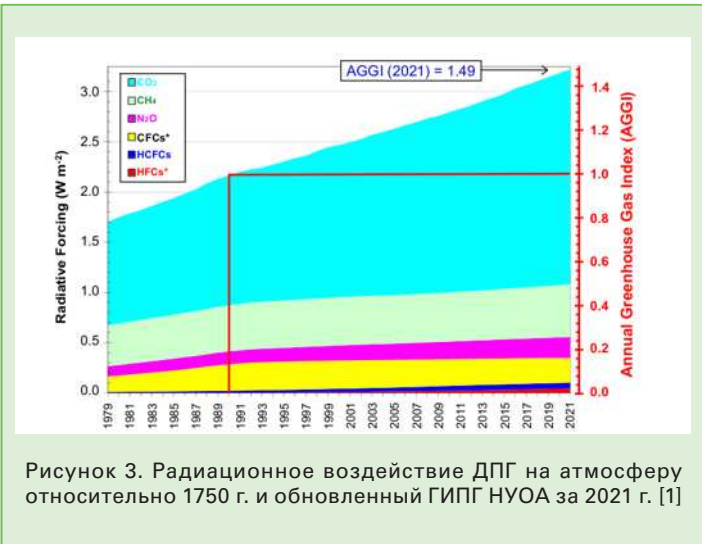


Рисунок 3. Радиационное воздействие ДПГ на атмосферу относительно 1750 г. и обновленный ГИПГ НУОА за 2021 г. [1]

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Глобальное среднее содержание в 2021 г.	415,7±0,2 млн ⁻¹	1908±2 млрд ⁻¹	334,5±0,1 млрд ⁻¹
Содержание 2021 г. относительно 1750 г. ^a	149 %	262 %	124 %
Абсолютное увеличение в 2020–2021 гг.	2,5 млн ⁻¹	18 млрд ⁻¹	1,3 млрд ⁻¹
Относительное увеличение в 2020–2021 гг.	0,61 %	0,95 %	0,39 %
Среднее годовое абсолютное увеличение за прошедшие 10 лет	2,46 млн ⁻¹ /год	9,2 млрд ⁻¹ /год	1,01 млрд ⁻¹ /год

^a Исходя из предположения о том, что в доиндустриальный период молярная доля CO₂ составляла 278,3 млн⁻¹, CH₄ — 729,2 млрд⁻¹, а N₂O — 270,1 млрд⁻¹. Число станций, данные которых использовались для анализа, составляет 147 для CO₂, 149 для CH₄ и 108 для N₂O.

Пример сокращения будущего глобального потепления: Монреальский протокол и его Кигалийская поправка

Гуус Велдерс, Алекс Вермойлен и Рэй Вайсс

Монреальский протокол по веществам, разрушающим озоновый слой, с его поправками и корректировками регулирует производство и потребление широкого спектра промышленных озоноразрушающих веществ (ОРВ), в основном галоидоуглеводородов, которые катализируют разрушение защитного стратосферного озонового слоя Земли. Протокол был принят в 1987 году и позволил весьма успешно сократить выбросы ОРВ, в частности потому, что легче регулировать производство и потребление, чем фактические выбросы. ОРВ не только воздействуют на разрушение озонового слоя, но и являются мощными парниковыми газами, поэтому до настоящего момента их эффективное регулирование в целях защиты озонового слоя также больше способствовало снижению будущего глобального потепления, чем сокращение выбросов любых других парниковых газов.

Галоидоуглеводороды, не содержащие хлор или бром, не разрушают стратосферный озон, поэтому для соблюдения Монреальского протокола многие ОРВ были первоначально заменены гидрофторуглеводородами (ГФУ); однако ГФУ являются сильными парниковыми газами. За последние два десятилетия выбросы ГФУ резко возросли, и в 2015 году, в отсутствие регулирования, прогнозировалось значительное увеличение использования и выбросов ГФУ, что потенциально могло привести к дополнительному глобальному приземному потеплению на 0,5 °C к 2100 году. В 2019 году вступила в силу Кигалийская поправка к Монреальскому протоколу, которая преследует цель ограничить использование ГФУ во всем мире. В настоящее время в ряде стран действуют нормы, ограничивающие использование ГФУ (Соединенные Штаты Америки ратифицировали эту поправку в сентябре 2022 года).

Согласно индексу ГИПГ НУОА, приведенному в другом месте настоящего бюллетеня, в настоящее время на галоидоуглеводороды приходится 11 % увеличения глобального радиационного воздействия, произошедшего с 1750 года (и, таким образом, 0,13 °C от текущего глобального приземного потепления на 1,3 °C выше уровня 1750 года). По оценкам, без дополнительных мер по контролю потребления ГФУ дополнительный вклад в глобальное среднее приземное потепление из-за ГФУ к 2100 году составит 0,28–0,44 °C.

Благодаря сокращению выбросов ГФУ, которое недавно было зафиксировано сетью мониторинга атмосферы AGAGE и другими сетями, вносящими вклад в глобальные наблюдения за ПГ ГСА ВМО, это увеличение будет ограничено до 0,14–0,31 °C к 2100 году. После подключения дополнительных механизмов регулирования, предусмотренных Кигалийской поправкой, снижение будет дополнительно ограничено до 0,04 °C. Хотя сейчас этого трудно достичь, но полный запрет на потребление ГФУ к 2023 году обеспечил бы практически нулевое дополнительное потепление к 2100 году [13]. Это также проиллюстрировано на рисунке 10, где показано прогнозируемое дополнительное потепление из-за галоидоуглеводородов при различных предположениях на период 2000–2100 годов.

Это хорошие примеры того, каким образом наблюдения предоставляют лицам, принимающим решения, информацию о необходимости принятия мер по ограничению вреда для окружающей среды и позволяют им отслеживать прогресс в достижении целей по сокращению выбросов. Это, в свою очередь, позволяет лицам, принимающим решения, и далее изменять нормативные положения для достижения желаемых целей.

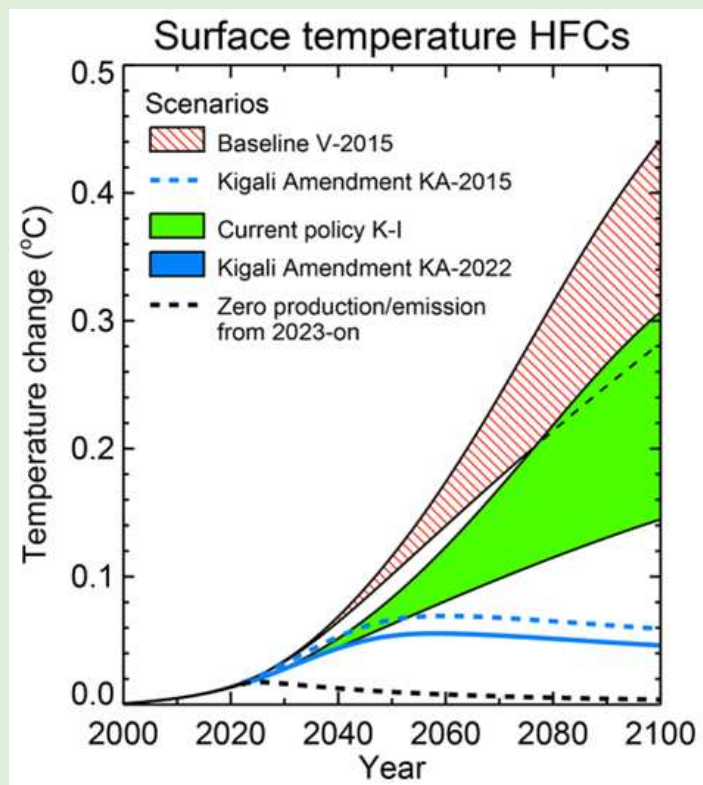


Рисунок 10. Вклад ГФУ в глобальное среднее приземное потепление для базового сценария V-2015 без осуществления мер, влияющих на потребление ГФУ, и текущей политики Кигали-независимого (К-Н) сценария. Полосы представляют собой верхний и нижний диапазоны этих сценариев. На рисунке также показаны последствия поэтапного отказа от ГФУ после осуществления мер регулирования Кигалийской поправки (КП-2022) и гипотетический сценарий, предполагающий прекращение глобального производства ГФУ в 2023 году. Для сценария Кигалийской поправки диапазон не показан, так как сценарии нижнего и верхнего диапазонов практически совпадают. Изменение приземной температуры рассчитывается с помощью модели MAGICC6. Кривые содержат вклад всех ГФУ, кроме ГФУ 23 (см. [13]).

Проблема интерпретации наблюдаемых колебаний темпов роста CH_4

Сандер Хоувелин и Эд Длугокенки

Как отмечено в статье на обложке настоящего бюллетеня, сеть мониторинга парниковых газов ГСА точно определяет глобальные темпы роста CH_4 в количественном выражении. Однако гораздо сложнее объяснить наблюдаемые колебания темпов роста с точки зрения географического происхождения и основных процессов, обуславливающих эти выбросы. Для этого необходимо разложить на составляющие динамику атмосферы, в которой новые выбросы быстро рассеиваются в больших объемах воздуха, прежде чем достигнуть точек отбора проб в сети. Для этого используются модели переноса примесей в атмосфере. Эти модели обеспечивают детальное представление погоды на земном шаре и рассчитывают ее влияние на перенос газов. Для оценки выбросов по результатам атмосферных измерений модели рассчитывают чувствительность каждого измерения к каждой единице выбросов на узлах координатной сетки приземных выбросов, которые они отслеживают. Для определения конфигурации выбросов, которая позволяет моделям наиболее точно согласовываться с измерениями, используется математическая процедура оптимизации.

Для запуска компьютерных программ, использующих этот так называемый метод обратного моделирования атмосферы, с достаточным пространственным и временным разрешением необходимо использовать суперкомпьютеры. Этим занимается, например, Европейская Служба мониторинга атмосферы в рамках программы «Коперник» (СМАК), которая с 1990 года предоставляет ежегодно обновляемый реанализ выбросов, полученных в результате измерений [14]. На рисунке 11 показана динамика глобальных выбросов CH_4 с течением времени, по данным последнего реанализа СМАК. При расчетах обратного моделирования в качестве отправной точки или первой ориентировочной информации используются кадастры выбросов в результате использования ископаемых видов топлива, сельского хозяйства, переработки отходов и т. д. Разница между первыми ориентировочными (априорными) и оптимизированными с помощью обратного моделирования (апостериорными) выбросами отражает новую информацию, которую дают измерения.

Точность оценки выбросов по результатам атмосферных измерений частично зависит от геометрии приземной сети (см. рисунок 4 настоящего бюллетеня). В регионах с недостаточными данными наблюдений, таких как тропические регионы и внутренние районы Азиатского континента, отмечаются наибольшие расчетные неопределенности выбросов. Большинство наблюдаемых колебаний темпов роста происходят почти синхронно в различных местах измерений по всей Земле (см. рисунок 12), что в обратных моделях объясняется изменением выбросов, происходящих в основном в тропиках. Однако ввиду ограниченной доступности измерений в тропических регионах сохраняется высокая неопределенность в оценках выбросов. В тропиках находятся не только выбросы от естественных водно-болотных угодий, отличающиеся высокой степенью неопределенности, но и самый крупный атмосферный поглотитель CH_4 , состоящий из гидроксил-радикалов. Приземные измерения дают ограниченную информацию, которая бы позволила

провести различие между увеличением приземных выбросов и сокращением атмосферных поглотителей, при том что увеличение содержания CH_4 в атмосфере может объясняться обоими процессами. Спутники, регистрирующие метан, такие как GOSAT и TROPOMI, обеспечивают ценное дополнительное покрытие в тропиках; однако над тропическими лесами покрытие остается слабым из-за того, что спутникам трудно обнаружить метан при наличии облачности. Как показало недавнее исследование оптимального дизайна сети, расширение сети *in situ* в тропических регионах с небольшим количеством станций, таких как тропические регионы Африки, значительно улучшит наши знания об источнике выбросов CH_4 [15].

Измерения стабильных изотопов накладывают значительные дополнительные ограничения на определение источника колебаний глобальной тенденции, как объясняется в статье на обложке настоящего бюллетеня, что явно свидетельствует о преобладающей роли микробных выбросов в недавнем увеличении содержания CH_4 (см., например, [16]). В сочетании с обратным моделированием, указывающим на тропические источники, это позволяет предположить, что за последние несколько лет выбросы метана из тропических болот могли возрасти. Выработка метана микробами в тропических водно-болотных угодьях чувствительна к изменению температурного режима и режима осадков, что формирует потенциальную положительную обратную связь с климатом (этот процесс все больше интересует ученых, что находит отражение в исследованиях, проведенных в последние годы (см., например, [17] и [18])). Известно, что выбросы метана из тропических болот также чувствительны к явлению Эль-Ниньо/южному колебанию (ЭНСО), так как ЭНСО влияет на режимы температуры и осадков, и в [19] сообщалось об увеличении выбросов метана в тропиках во время сильного явления Ла-Нинья в 2011 году. Фаза Ла-Нинья, начавшаяся в 2020 году и продолжающаяся до сих пор, вполне могла способствовать недавнему рекордному увеличению глобальных темпов роста метана.

Однако основная проблема интерпретации наблюдаемых изменений темпов роста метана заключается в том, чтобы доказать, какой именно из нескольких возможных сценариев действительно имел место. Например, в случае увеличения темпов роста в 2020 году способствующим фактором могло быть влияние режима ограничений, связанных с COVID-19, на химию атмосферы и поглощение метана гидроксил-радикалами [20]. Однако атмосферные поглотители вряд ли могут объяснить значительное годовое увеличение CH_4 , наблюдаемое в 2021 году. Инициатива Глобального углеродного проекта (ГУП) по составлению глобального бюджета метана играет важную роль в синтезе информации, доступной из кадастров выбросов, процессно-ориентированных моделей и обратного моделирования. В рамках этой инициативы используется ансамбль моделей для оценки неопределенности моделей. Этот процесс занимает несколько лет, но в настоящее время это единственный способ собрать достаточно информации для поиска наиболее вероятного объяснения ускоряющегося роста содержания метана в атмосфере.

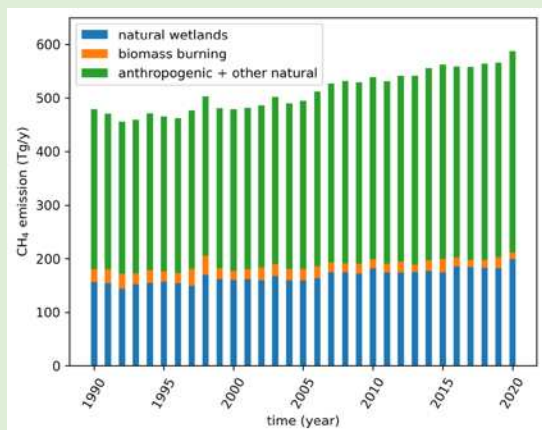


Рисунок 11. Апостериорные выбросы CH_4 по данным реанализа обратного моделирования СМАК v20r1. Категория «другие природные» включает поглощение метана почвами.

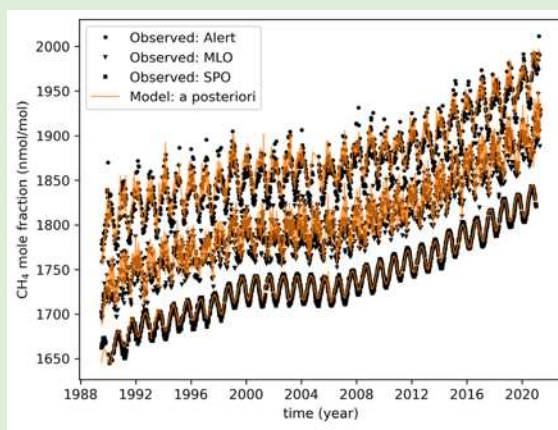


Рисунок 12. Апостериорное соответствие обратного моделирования CH_4 СМАК измерениям на отдельных станциях (MLO = станция Мауна-Лоа, SPO = станция Южного полюса)

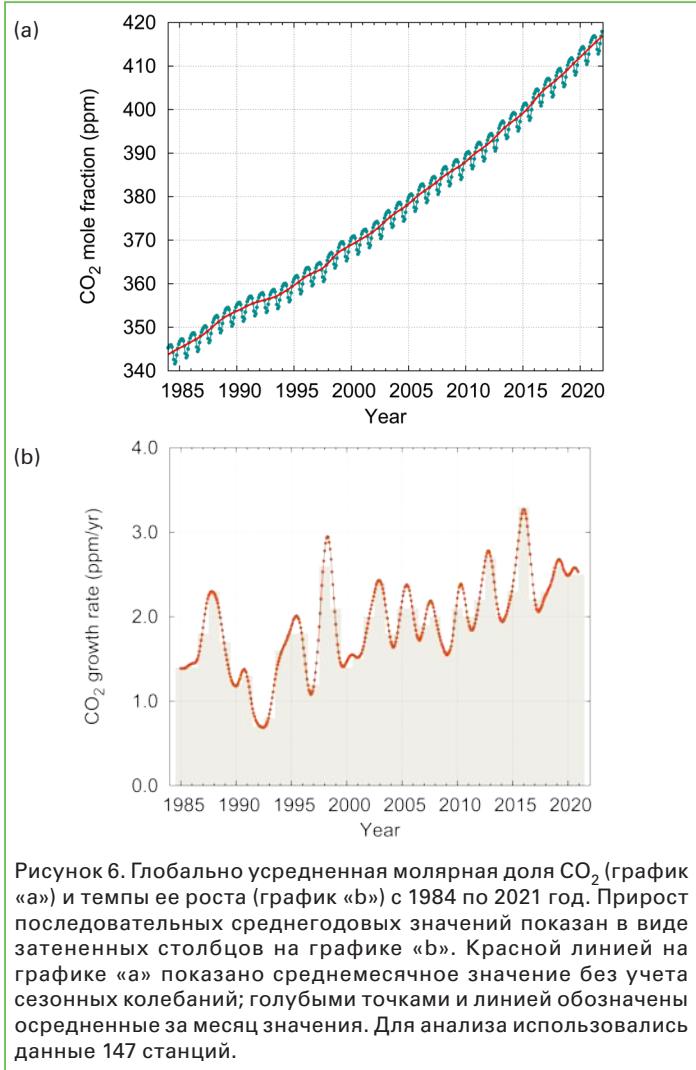
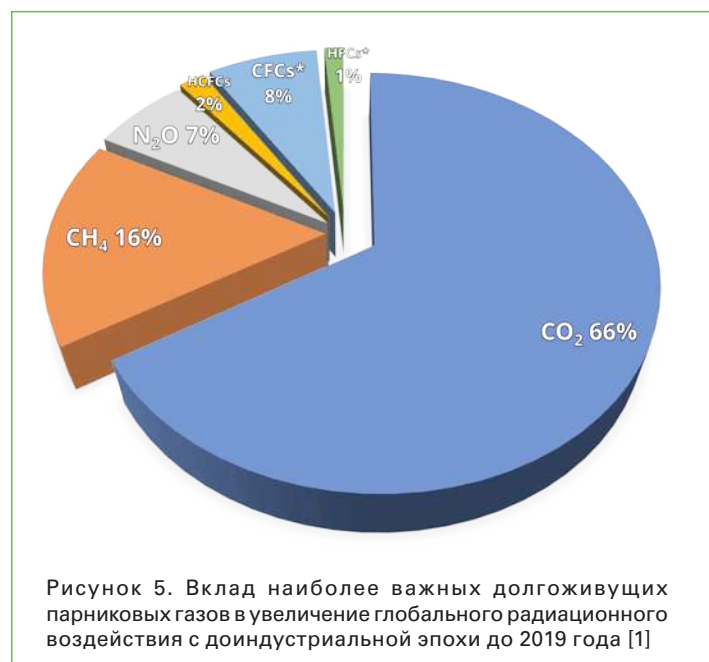
атмосфере. Наблюдения ГСА предоставляют неоценимую информацию об ограничениях при расчете бюджетов этих или иных ДПГ и используются для улучшения оценок выбросов и оценки среднего содержания ДПГ в столбе атмосферы, определенного со спутника. Интегрированная глобальная информационная система по парниковым газам (ИГИСПГ) позволяет получить дополнительное представление об источниках ПГ на национальном и субнациональном уровнях (<https://ig3is.wmo.int>).

Учитывая растущее внимание к роли парниковых газов как фактора изменения климата и необходимость укрепления информационной базы по ПГ для принятия решений об мерах по смягчению последствий изменения климата, ВМО работает с более широким сообществом специалистов по парниковым газам над созданием рамочной основы для устойчивого, координируемого на международном уровне глобального мониторинга парниковых газов (см. <https://public.wmo.int/en/our-mandate/focus-areas/environment/greenhouse-gases/global-greenhouse-gas-monitoring-infrastructure>). Во исполнение решений семьдесят пятой сессии Исполнительного совета ВМО, специальная исследовательская группа в настоящее время разрабатывает концепцию инфраструктуры мониторинга парниковых газов, которая сформулирует международно скоординированный подход к проектированию сети наблюдений, а также к получению, международному обмену и использованию результатов наблюдений. В рамках этой инфраструктуры ВМО будет взаимодействовать и тесно сотрудничать как с широким научным сообществом, так и с другими учреждениями Организации Объединенных Наций и международными координационными органами, участвующими в деятельности по мониторингу ПГ, в частности, в отношении наблюдений и моделирования поверхности суши и океана.

ГИПГ НУОА измеряет увеличение общего радиационного воздействия всех ДПГ с 1990 года [1]. В 2021 году ГИПГ НУОА достиг 1,49, что указывает на увеличение общего радиационного воздействия⁽⁶⁾ на 49 % с 1990 до 2021 года и на 1,2 % — с 2020 по 2021 год (рисунок 3). Суммарное радиационное воздействие всех ДПГ в 2021 году ($3,22 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$) соответствует молярной доле эквивалента CO_2 , составляющей 508 млн^{-1} [1]. Относительные вклады основных парниковых газов в общее радиационное воздействие после доиндустриального периода представлены на рисунке 5.

Двуокись углерода (CO_2)

Двуокись углерода является единственным наиболее важным антропогенным парниковым газом в атмосфере, доля которого



в радиационном воздействии ДПГ составляет приблизительно 66 %⁽⁶⁾. Его вклад в увеличение радиационного воздействия за последнее десятилетие составляет ~81 %⁽⁶⁾ и ~80 % за последние пять лет. Доиндустриальный уровень, составлявший ~278,3 млн⁻¹, отражал баланс потоков между атмосферой, океанами и биосферой суши. Глобально усредненная молярная доля CO_2 в 2021 году составила $415,7 \pm 0,2 \text{ млн}^{-1}$ (рисунок 6). Прирост среднегодового значения с 2020 по 2021 год, составивший $2,5 \text{ млн}^{-1}$, был равен приросту с 2019 по 2020 год и чуть превысил средние темпы роста за последнее десятилетие ($2,46 \text{ млн}^{-1}/\text{год}$).

В 2021 году содержание CO_2 в атмосфере достигло 149 % от доиндустриального уровня, главным образом из-за выбросов от сжигания ископаемого топлива и производства цемента. По данным Международного энергетического агентства, глобальные выбросы CO_2 в результате сжигания топлива и промышленных процессов вновь возросли до $36,3 \text{ ГтCO}_2$ (7) в 2021 году, увеличившись на 6 % по сравнению с $34,2 \text{ ГтCO}_2$ в 2020 году, и за этот год выбросы снизились по отношению к уровню предыдущего года благодаря ограничениям, связанным с пандемией COVID-19 [5, 6]. Согласно анализу Глобального углеродного проекта за 2021 год [7], вклад в результате вырубки лесов и других изменений в землепользовании составил $4,1 (\pm 2,6) \text{ ГтCO}_2/\text{год}$ в среднем за 2011–2020 годы. Из всего объема выбросов в результате человеческой деятельности в период с 2011 по 2020 год около 48 % аккумулировалось в атмосфере, 26 % — в океане и 29 % — на суше; а не соотношенный ни с чем дисбаланс бюджета составляет 3 % [7]. Доля выбросов CO_2 из-за сжигания ископаемого топлива, которая остается в атмосфере (атмосферная фракция), изменяется каждый год вследствие значительной естественной изменчивости поглотителей CO_2 без подтвержденной при этом глобальной тенденции (см. также статью на обложке [семнадцатого Бюллетеня ВМО по парниковым газам](#)).

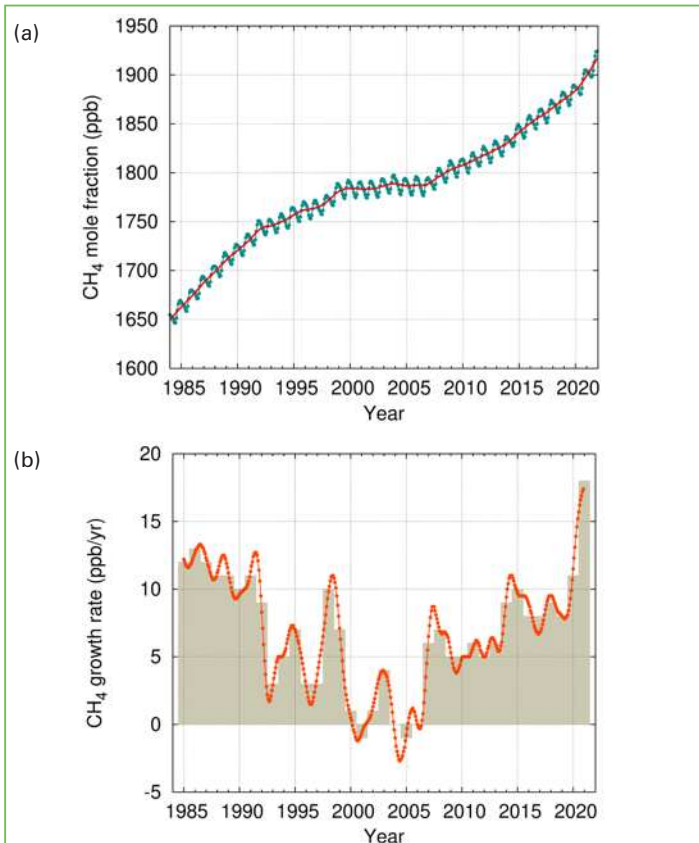


Рисунок 7. Глобально усредненная молярная доля CH_4 (график «а») и темпы ее роста (график «б») с 1984 по 2021 год. Прирост последовательных среднегодовых значений показан в виде затененных столбцов на графике «б». Красной линией на графике «а» показано среднемесячное значение без учета сезонных колебаний; голубыми точками и линией обозначены осредненные за месяц значения. Для анализа использовались данные 149 станций.

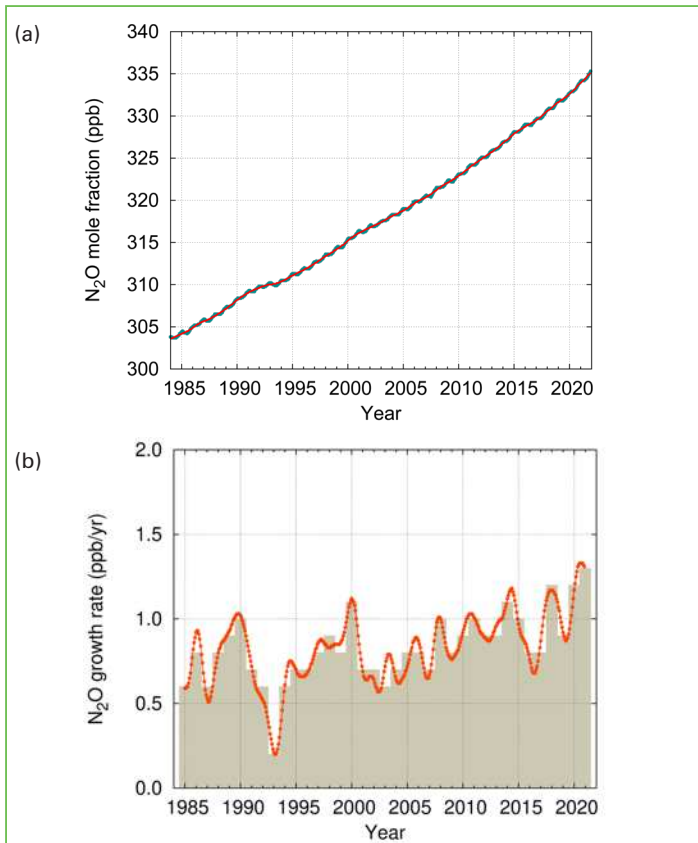


Рисунок 8. Глобально усредненная молярная доля N_2O (график «а») и темпы ее роста (график «б») с 1984 по 2021 год. Прирост последовательных среднегодовых значений показан в виде затененных столбцов на графике «б». Красной линией на графике «а» показано среднемесячное значение без учета сезонных колебаний; на данном графике она совпадает с голубыми точками и линией, обозначающими осредненные за месяц значения. Для анализа использовались данные 108 станций.

Метан (CH_4)

Доля метана в радиационном воздействии ДПГ составляет около 16 %⁽⁶⁾. Приблизительно 40 % метана поступает в атмосферу из естественных источников (например, водно-болотные угодья (N_2O) и термитники) и около 60 % — из антропогенных (например, жизнедеятельность жвачных животных, выращивание риса, использование ископаемого топлива, захоронение отходов и сжигание биомассы) [8]. Глобально усредненная доля CH_4 , рассчитанная на основании наблюдений *in situ*, достигла в 2021 году нового максимума, составившего 1908 ± 2 млрд⁻¹, увеличившись на 18 млрд⁻¹ по отношению к предыдущему году (рисунок 7). Эта величина выше величины 11 млрд⁻¹, зафиксированной с 2019 по 2020 год, и выше среднегодового увеличения за последнее десятилетие. Среднегодовой прирост CH_4 снизился с приблизительно 12 млрд⁻¹/год в конце 1980-х годов до почти нулевого значения в период с 1999 по 2006 год. С 2007 года содержание CH_4 в атмосфере увеличивается, достигнув 262 % по отношению к доиндустриальному уровню в связи с увеличением выбросов из антропогенных источников. Исследования, основанные на данных измерений CH_4 ГСА, указывают на то, что вероятной причиной этого недавнего роста является увеличение выбросов CH_4 из болот в тропиках и выбросов из антропогенных источников в средних широтах Северного полушария. Более подробная информация об увеличении содержания CH_4 в атмосфере изложена в статье на обложке и во вкладке настоящего бюллетеня.

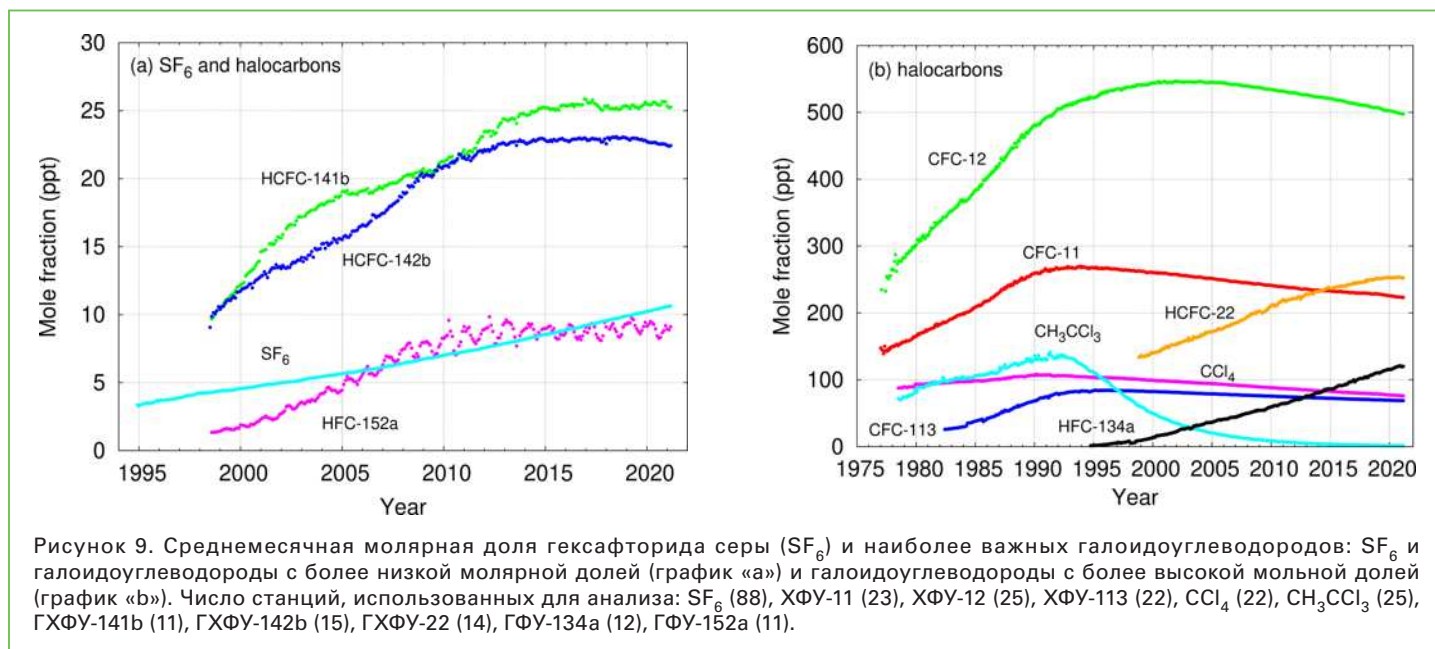
Закись азота (N_2O)

Доля закиси азота в радиационном воздействии ДПГ составляет около 7 %⁽⁶⁾. Это третий наиболее важный ДПГ по своему вкладу в общее радиационное воздействие. N_2O поступает в атмосферу

как из естественных (около 57 %), так и из антропогенных источников (приблизительно 43 %), включая океаны, почву, сжигание биомассы, использование удобрений и различные промышленные процессы [9]. Глобально усредненная молярная доля N_2O в 2021 году достигла $334,5 \pm 0,1$ млрд⁻¹, что на 1,3 млрд⁻¹ выше показателя предыдущего года (рисунок 8) и на 124 % выше доиндустриального уровня (270,1 млрд⁻¹). Годовое увеличение с 2020 по 2021 год было более значительным, чем увеличение в период с 2019 по 2020 год, а также более значительным, чем средние темпы роста за последние 10 лет (1,01 млрд⁻¹/год). Глобальные антропогенные выбросы N_2O , в которых преобладают выбросы от азотных удобрений для пахотных земель, увеличились на 30 % за последние четыре десятилетия до 7,3 (диапазон: 4,2—11,4) тераграмм азота в год. Этим увеличением в основном объясняется рост атмосферной нагрузки N_2O [9].

Прочие парниковые газы

Вклад хлорфторуглеродов (ХФУ), разрушающих стратосферный озоновый слой, (регулируется Монреальским протоколом по веществам, разрушающим озоновый слой) вместе с менее значимыми галоидированными газами в радиационное воздействие ДПГ составляет ~11 %⁽⁶⁾. В то время как содержание ХФУ и большинства галонов уменьшается, доля некоторых гидрохлорфторуглеродов (ГХФУ) и гидрофторуглеродов (ГФУ), которые также являются мощными парниковыми газами, возрастает относительно быстрыми темпами; хотя их концентрации по-прежнему находятся на низком уровне (на уровне трлн⁻¹⁽⁸⁾). Несмотря на такое же низкое содержание, гексафторид серы (SF_6) является чрезвычайно мощным ДПГ. Он производится химической промышленностью, главным образом в качестве электроизоляционного материала в



оборудовании для распределения электроэнергии. В настоящее время его молярная доля более чем в два раза выше уровня, наблюдавшегося в середине 1990-х годов (рисунок 9, график «а»).

В настоящем бюллетене в первую очередь рассматриваются долгоживущие парниковые газы. Радиационное воздействие относительно короткоживущего тропосферного озона сопоставимо с радиационным воздействием галогенуглеродов [10]. 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) являются короткоживущими веществами, которые изменяют радиационный баланс. Все упомянутые здесь газы, а также аэрозоли включены в программу наблюдений ГСА при поддержке Членов ВМО и сетей, предоставляющих данные [11].

Выражение признательности и ссылки

Пятьдесят пять Членов ВМО внесли свой вклад в форме предоставления данных о CO_2 и других парниковых газах в МЦДПГ ГСА. Приблизительно 39 % данных измерений, переданных в МЦДПГ, было собрано на станциях совместной сети отбора проб воздуха Научно-исследовательской лаборатории НУОА по глобальному мониторингу. Данные по другим сетям и станциям см. в [12]. В подготовку настоящего бюллетеня также был внесен вклад по линии [Расширенного эксперимента по глобальным атмосферным газам](#). Станции наблюдений ГСА, предоставившие данные для использования в настоящем бюллетене, отмечены на рисунке 4 и перечислены в списке станций, внесших вклад в подготовку бюллетеня, на [веб-странице МЦДПГ](#). Они также описаны в [Системе информации о станциях ГСА](#) (СИСГСА), которая получает поддержку со стороны Швейцарского федерального бюро по метеорологии и климатологии (МетеоСвисс). Подготовку настоящего бюллетеня курировала Научная консультативная группа ГСА по парниковым газам.

Редакционная группа

Алекс Вермойлен (Интегрированная система наблюдения за углеродом — Европейский консорциум исследовательской инфраструктуры (ИКОС ЕКИИ)/Лундский университет, Швеция), Юсуке Сава (Японское метеорологическое агентство, МЦДПГ, Япония), Оксана Тарасова (ВМО)

Авторы

Энди Кротвелл (Научная лаборатория НУОА по глобальному мониторингу, Объединенный институт исследований в области наук об окружающей среде, Университет штата Колорадо в Боулдере, Соединенные Штаты Америки), Эд Длугокенки (Научная лаборатория НУОА по глобальному мониторингу), Кристоф Гербиг (Институт биогеохимии Макса Планка, Германия), Дэвид Гриффит (Университет Вуллонгонга, Австралия), Брэдли Холл (Лаборатория глобального мониторинга НУОА, США), Сандер Хоувелин (Амстердамский свободный университет, Нидерланды), Армин Джордан (Институт биогеохимии Макса Планка, Германия), Пол Круммел (Организация по научным и промышленным исследованиям для стран Содружества, Австралия), Хэян Ли (Метеорологическое бюро Кореи, Национальный институт метеорологии, Республика Корея), Зое Лох (Организация по научным и промышленным исследованиям для стран Содружества, Австралия), Юсуке Сава (Метеорологическое бюро Японии, МЦДПГ, Япония), Оксана Тарасова (ВМО), Джоселин Тернбул (ГНС Наука, Новая Зеландия/Объединенный институт исследований в области наук об окружающей среде, Университет штата Колорадо в Боулдере, США), Гуус Велдерс (Национальный институт здравоохранения и окружающей среды, Билтховен, Нидерланды), Алекс Вермойлен (ИКОС ЕКИИ/Лундский университет, Швеция), Рэй Вайсс (Океанографический институт Скриппса, Университет Калифорнии, Сан-Диего, США)

Ссылки

- [1] Montzka, S. A. *The NOAA Annual Greenhouse Gas Index (AGGI)*. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Earth System Research Laboratories Global Monitoring Laboratory, 2022. <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.html>.
- [2] National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Earth System Research Laboratories Global Monitoring Laboratory. *Trends in Atmospheric Carbon Dioxide*, 2022. <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>.
- [3] Tsutsumi, Y.; Mori, K.; Hirahara, T. et al. *Technical Report of Global Analysis Method for Major Greenhouse Gases by the World Data Center for Greenhouse Gases* (WMO/TD-No. 1473). GAW Report No. 184. World Meteorological Organization (WMO): Geneva, 2009.
- [4] Hall, B. D.; Crotwell, A. M.; Kitzis, D. R. et al. Revision of the World Meteorological Organization Global Atmosphere Watch

- (WMO/GAW) CO₂ Calibration Scale. *Atmospheric Measurement Techniques* **2021**, 14 (4), 3015–3032. <https://doi.org/10.5194/amt-14-3015-2021>.
- [5] Le Quéré, C.; Jackson, R. B.; Jones, M. W. et al. Temporary Reduction in Daily Global CO₂ Emissions during the COVID-19 Forced Confinement. *Nat. Clim. Chang.* **2020**, 10 (7), 647–653. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0797-x>.
 - [6] International Energy Agency (IEA). *Global Energy Review: CO₂ Emissions in 2021*; IEA: Paris, 2022. <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-co2-emissions-in-2021-2>.
 - [7] Friedlingstein, P.; Jones, M. W.; O'Sullivan, M. et al. Global Carbon Budget 2021. *Earth System Science Data* **2022**, 14 (4), 1917–2005. <https://doi.org/10.5194/essd-14-1917-2022>.
 - [8] Saunio, M.; Stavert, A. R.; Poulter, B. et al., The Global Methane Budget 2000–2017. *Earth System Science Data* **2020**, 12 (3), 1561–1623. <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>.
 - [9] Tian, H.; Xu, R.; Canadell, J. G. et al. A Comprehensive Quantification of Global Nitrous Oxide Sources and Sinks. *Nature* **2020**, 586 (7828), 248–256. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2780-0>.
 - [10] World Meteorological Organization (WMO). *WMO Reactive Gases Bulletin: Highlights from the Global Atmosphere Watch Programme, No. 2*; WMO: Geneva, 2018.
 - [11] World Meteorological Organization (WMO). *WMO Air Quality and Climate Bulletin, No. 2*; WMO: Geneva, 2022.
 - [12] World Meteorological Organization (WMO). *20th WMO/IAEA Meeting on Carbon Dioxide, Other Greenhouse Gases and Related Measurement Techniques (GGMT-2019)*. GAW Report No. 255; WMO: Geneva, 2020.
 - [13] Velders, G. J. M.; Daniel, J. S.; Montzka, S. A. et al. Projections of Hydrofluorocarbon (HFC) Emissions and the Resulting Global Warming Based on Recent Trends in Observed Abundances and Current Policies. *Atmospheric Chemistry and Physics* **2022**, 22 (9), 6087–6101, <https://doi.org/10.5194/acp-22-6087-2022>.
 - [14] Segers, A. J.; Tokaya, J.; Houweling, S. *Description of the CH₄ Inversion Production Chain*; Copernicus Atmosphere Monitoring Service, 2020. https://atmosphere.copernicus.eu/sites/default/files/2021-01/CAMS73_2018SC3_D73.5.2.2-2020_202012_production_chain_Ver1.pdf.
 - [15] Nickless, A.; Scholes, R. J.; Vermeulen, A. et al. Greenhouse Gas Observation Network Design for Africa. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology* **2020**, 72 (1), 1824486. <https://doi.org/10.1080/16000889.2020.1824486>.
 - [16] Lan, X.; Basu, S.; Schwiethke, S. et al. Improved Constraints on Global Methane Emissions and Sinks Using $\delta^{13}\text{C}$ -CH₄. *Global Biogeochemical Cycles* **2021**, 35 (6), e2021GB007000. <https://doi.org/10.1029/2021GB007000>.
 - [17] Lunt, M. F.; Palmer, P. I.; Feng, L. et al. An Increase in Methane Emissions from Tropical Africa between 2010 and 2016 Inferred from Satellite Data. *Atmospheric Chemistry and Physics* **2019**, 19 (23), 14721–14740. <https://doi.org/10.5194/acp-19-14721-2019>.
 - [18] Feng, L.; Palmer, P. I.; Zhu, S. et al. Tropical Methane Emissions Explain Large Fraction of Recent Changes in Global Atmospheric Methane Growth Rate. *Nature Communications* **2022**, 13 (1), 1378. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-28989-z>.
 - [19] Pandey, S.; Houweling, S.; Krol, M. et al. Enhanced Methane Emissions from Tropical Wetlands during the 2011 La Niña. *Scientific Reports* **2017**, 7 (1), 45759. <https://doi.org/10.1038/srep45759>.
 - [20] Gkatzelis, G. I.; Gilman, J. B.; Brown, S. S. et al. The Global Impacts of COVID-19 Lockdowns on Urban Air Pollution: A Critical Review and Recommendations. *Elementa: Science of the Anthropocene* **2021**, 9 (1), 00176. <https://doi.org/10.1525/elementa.2021.00176>.

Контактная информация

Всемирная метеорологическая организация, отдел исследований атмосферной среды, департамент науки и инноваций, Женева
Эл. почта: gaw@wmo.int
Веб-сайт: <https://community.wmo.int/activity-areas/gaw>

Мировой центр данных по парниковым газам
Японское метеорологическое агентство, Токио
Эл. почта: wdcgg@met.kishou.go.jp
Веб-сайт: <https://gaw.kishou.go.jp>

Примечания:

- (1) Внутригодовое увеличение содержания CH₄ в атмосфере рассчитывается как увеличение содержания CH₄ в атмосфере на линии тренда с исключением сезонной составляющей с 1 января одного года по 1 января следующего года в соответствии с данными, представленными на веб-странице [Тенденции CH₄ Национального управления по исследованию океанов и атмосферы \(НУОА\)](#).
- (2) млрд⁻¹ = число молекул газа на миллиард (10⁹) молекул сухого воздуха
- (3) Радиационное воздействие — это возмущение энергетического бюджета Земли в результате увеличения содержания парниковых газов по сравнению с доиндустриальным периодом (1750 год) после быстрой коррекции стратосферной температуры. «Эффективное» радиационное воздействие также включает быстрые тропосферные корректировки. Просьба обратить внимание, что в представленных здесь значениях учитывается только прямое радиационное воздействие CH₄ и CO₂, по сравнению с воздействием на основе выбросов, используемым в [докладе ОД 6 МГЭИК, РГ1](#), которое включает расчетное косвенное воздействие вследствие химии атмосферы при наличии CH₄, который влияет на другие компоненты атмосферы.
- (4) Молярная доля = предпочтительное выражение для содержания (концентрации) смеси газов или жидкостей. В атмосферной химии используется для выражения концентрации как числа молей соединения на моль сухого воздуха
- (5) млн⁻¹ = число молекул газа на миллион (10⁶) молекул сухого воздуха
- (6) Эта процентная доля рассчитывается как относительный вклад вышеупомянутого(ых) газа(ов) в повышение глобального радиационного воздействия, вызванного всеми ДПГ с 1750 года
- (7) 1 ГтCO₂ = 1 миллиард (10⁹) метрических тонн диоксида углерода
- (8) трлн⁻¹ = число молекул газа на триллион (10¹²) молекул сухого воздуха

Отдельные обсерватории для мониторинга парниковых газов

Соданкюля/Паллас (SDK/PAL)



Станция Соданкюля

Станция Соданкюля/Паллас включает в себя Арктический космический центр в Соданкюля и станцию исследований чистого воздуха в Палласе. Расстояние между этими двумя площадками составляет 125 км. Обе они размещены в Финском метеорологическом институте и принадлежат ему.

Станция Соданкюля (SDK) была основана в 1949 году, но для этой площадки имеются записи непрерывных гомогенизированных синоптических погодных данных начиная с 1908 года. Сейчас площадь объекта составляет 1500 м² и включает в себя несколько зданий, а также опорные мачты в лесу и болотистом поле и несколько лагерей для воздушных измерений.

Обсерватория образует участок для наблюдения за верхними слоями атмосферы финской станции ГСА и обеспечивает вертикально разрешенные метеорологические и озоновые данные, а также данные о частицах в стратосфере. Обсерватория расположена в центральной части Лапландии, к северу от полярного круга. Соданкюля является глобальной станцией ГСА и входит в состав Сети определения изменения состава атмосферы, Сети наблюдений за общим содержанием углерода в вертикальном столбе атмосферы и Робототехнической сети по аэрозолям, которые представляют собой сети дистанционного зондирования.



Станция Паллас

Станция Паллас (PAL) действует с 1994 года. Это глобальная станция ГСА по парниковым газам, которая входит в состав Интегрированной системы наблюдений за углеродом (ИКОС), Инфраструктуры исследования аэрозолей, облаков и малых газовых примесей (АКТРИС) и Интегрированной европейской сети долгосрочных исследований экосистем, критических зон и социально-экологических последствий (еЛТЕР).

Местоположение

Страна: Финляндия
Широта: 67,364° с.ш.
Долгота: 26,63° в.д.
Высота: 180 м над уровнем моря
Часовой пояс: UTC+2



Региональная обсерватория ГСА Чеджу Госан (СПНГ)



Станция ГСА Госан

Станция ГСА Госан на острове Чеджу в Южной Корее расположена в северной части Восточно-Китайского моря, примерно в 100 км к югу от Корейского полуострова, в 500 км к северо-востоку от Шанхая, Китай, и в 250 км к западу от Кюсю, Япония. Площадка Госан расположена на западном берегу острова на вершине 72-метровой скалы, обращенной к Восточно-Китайскому морю. Остров Чеджу считается одним из самых чистых районов Южной Кореи. На этой станции осуществляется мониторинг более 22 составляющих элементов атмосферы ГСА, включая парниковые газы, аэрозоли и реактивные газы. С 1990-х годов она используется для таких международных кампаний, как Эксперимент по характеристике аэрозолей (ЭХА)-Азия и проект по коричневым облакам в атмосфере, а также для Расширенного эксперимента по глобальным атмосферным газам (AGAGE). Она также входит в состав Сети лидарных наблюдений за аэрозолями и выбросами пыли в Азии (АД Нет) и других международных сетей, а также сети станций ГСА.

Местоположение

Страна: Республика Корея
Широта: 33,294° с.ш.
Долгота: 126,163° в.д.
Высота: 71 м над уровнем моря
Часовой пояс: UTC+9

