



БЮЛЛЕТЕНЬ ВМО ПО ПАРНИКОВЫМ ГАЗАМ

Содержание парниковых газов в атмосфере по данным глобальных наблюдений в 2020 году

№ 17 | 25 октября 2021 года

ISSN 2078-0710

На сегодняшний день примерно половина объема выбросов диоксида углерода (CO_2) в результате деятельности человека остается в атмосфере. Другая часть поглощается океанами и наземными экосистемами. Доля выбросов, остающихся в атмосфере (атмосферная фракция (АФ)), является важным показателем баланса между источниками и поглотителями. АФ значительно варьируется из года в год, и на протяжении последних 60 лет относительно неопределенные среднегодовые значения колебались в пределах от 0,2 (20 %) до 0,8 (80 %). Тем не менее статистический анализ указывает на отсутствие существенной тенденции к изменению среднего значения АФ, равного 0,42, в долгосрочной перспективе (около 60 лет) (см. рисунок 1). Это означает, что только 42 % антропогенных выбросов CO_2 остается в атмосфере. Количество поглотителей CO_2 на суше и в океане продолжает увеличиваться пропорционально росту выбросов. Учитывая, что процессы поглощения чувствительны к изменениям климата и землепользования, трудно сказать, как АФ изменится в будущем.

Изменения в АФ окажут существенное влияние на процесс достижения цели Парижского соглашения о снижении глобального потепления до уровня значительно ниже 2°C и потребуют корректировки сроков и/или размера обязательств по сокращению выбросов. Непрерывное изменение климата и его последствия, такие как учащение засух и увеличение частоты и интенсивности

лесных пожаров [2], могут привести к снижению уровня поглощения CO_2 наземными экосистемами. Поглощение CO_2 океаном также может сократиться в результате роста температуры поверхности моря, снижения pH на фоне поглощения CO_2 [3] и замедления меридиональной опрокидывающей циркуляции из-за усиленного процесса оттаивания морского льда [4]. Своевременная и точная информация об изменениях в АФ имеет решающее значение для обнаружения будущих сдвигов в балансе источников и поглотителей.

К счастью, благодаря наблюдениям за атмосферным CO_2 в ключевых точках по всему миру в рамках Программы Глобальной службы атмосферы ВМО (ГСА) и участвующих в ней сетей, мы имеем доступ к необходимой информации. Эти долгосрочные и точные наблюдения дают прямое представление о тенденции изменения уровня атмосферных концентраций CO_2 и других парниковых газов (ПГ), как было продемонстрировано в настоящем и предыдущих выпусках Бюллетеня. Эти данные могут быть объединены с другими наблюдениями (например, соотношениями стабильных изотопов и соотношениями кислород/азот (O_2/N_2)) и инверсными моделями, в которых применяются модели переноса атмосферных примесей. Они могут способствовать получению количественной информации о силе основных процессов поглощения CO_2 в рамках глобального углеродного цикла и проанализировать АФ и факторы, способствующие ее изменению [5].

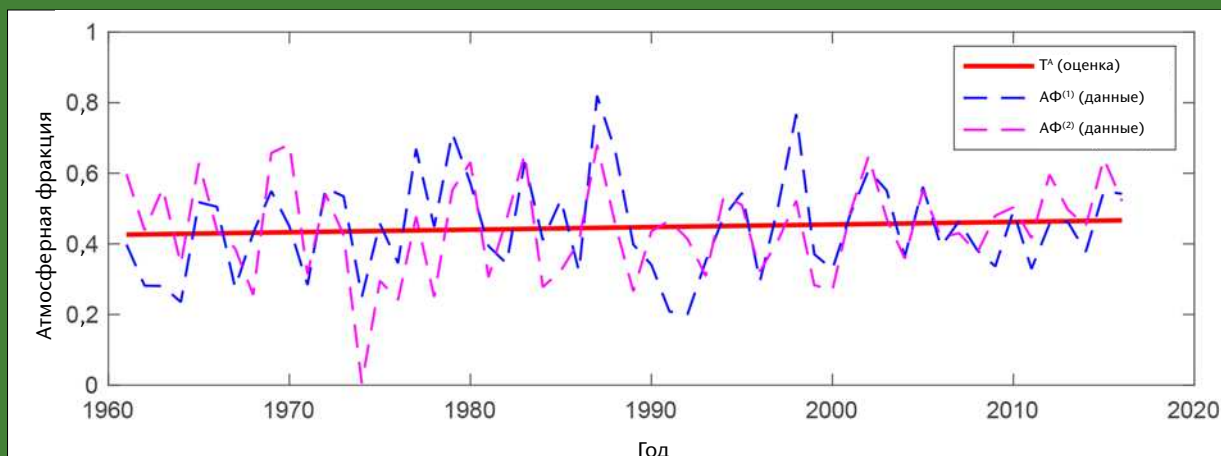


Рисунок 1. Приближение линейного тренда АФ (T^A) за период 1960—2016 годов [1]. Отдельные оценки среднегодовых значений АФ изображены пунктирными линиями и были реализованы с применением двух методов: с нулевым ($\text{АФ}^{(1)}$) и ненулевым ($\text{АФ}^{(2)}$) дисбалансом углеродного бюджета. Незначительный подъем линии тренда на протяжении исследуемого периода не является статистически значимым.

На основе данных этих непосредственных наблюдений могут быть предоставлены более точные прогнозы уровней CO_2 для ожидаемых сценариев выбросов, что позволит улучшить и климатические прогнозы. На рисунке 2 представлен пример анализа, в котором долгосрочные наблюдения на одной станции могут быть использованы для определения распределения выбросов CO_2 от сжигания ископаемого топлива между поглотителями на суше и в океане, основываясь на том факте, что CO_2 и O_2 для дыхания и фотосинтеза изменяются одновременно, в то время как при газообмене с океаном этот эффект не наблюдается. Следует отметить, что данный анализ охватывает период, отличный от периода, описанного на рисунке 1, а также не включает все источники неопределенности, такие как репрезентативность станции и погрешности калибровки.

Для большей поддержки политики сокращения выбросов ПГ посредством анализа природных поглотителей и выбросов ископаемого топлива, а также сужения ее фокуса до регионального или местного уровня необходимо повышение устойчивости существующей сети *in situ* и получение дополнительных данных *in situ*. Эти процессы неразрывно связаны с расширением возможностей дистанционного зондирования, особенно

в недостаточно охваченных в настоящее время регионах, таких как Африка и другие тропические регионы.

В Отчете о состоянии ГСНК в 2021 году [6] отмечаются недавние улучшения доступности наблюдений, например, в сети ПГ ГСА, в том числе спутниковых наблюдений. Кроме этого в отчете выделяются четыре основные области, которые все еще нуждаются в развитии:

- обеспечение устойчивости наблюдений;
- устранение пробелов в системе;
- обеспечение постоянного, свободного и неограниченного доступа к наблюдениям;
- увеличение поддержки политики, руководствующейся Парижским соглашением РКИК ООН.

Последний пункт потребует большего количества региональных наблюдений (в городских и содействующих сетях, таких как Интегрированная система наблюдения за углеродом) по всему земному шару. ГСА ВМО вносит собственный вклад в данную работу, например, через инициативу ИГИСПГ (<https://ig3is.wmo.int/>, см. также Бюллетень по ПГ №12), в рамках которой разрабатывается международный стандарт для мониторинга городских выбросов ПГ.

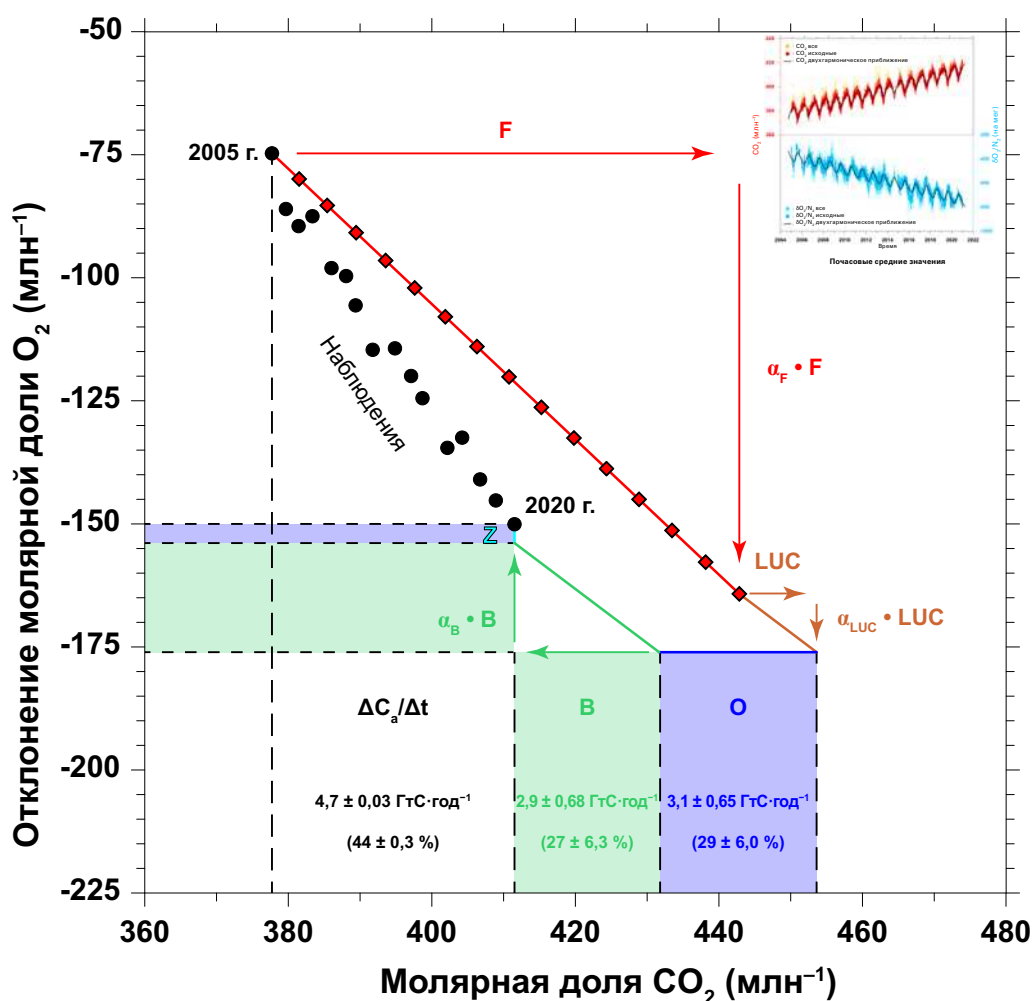


Рисунок 2. Анализ мирового углеродного бюджета на основе наблюдений за CO_2 и O_2 на глобальной станции ВМО ГСА в Юнгфрауйох, Швейцария [7]. На вставке справа сверху изображены исходные почасовые временные ряды для CO_2 и соотношения O_2/N_2 за период с 2005 по 2021 год. Результат анализа показывает, что на протяжении 16-летнего периода процент выбросов, остающихся в атмосфере, составляет 44 % ($\Delta C_a / \Delta t = 0,44$), глобальное поглощение биосферы (B) — 27 % и глобальное поглощение океана (O) — 29 %. Красная линия изображает теоретические изменения уровней CO_2 и O_2 в ответ на выбросы ископаемого топлива (F) и выбросы, связанные с изменением в землепользовании (LUC). (Z) иллюстрирует изменения в уровне O_2 , связанные с термальной дегазацией океана.

Резюме

Последний анализ данных наблюдений, полученных на сети наблюдений *in situ* ГСА ВМО, показывает, что глобально усредненные приземные молярные доли⁽¹⁾ для CO₂, метана (CH₄) и закиси азота (N₂O) достигли в 2020 году новых максимумов, причем для CO₂ он составил 413,2 ± 0,2 млн⁻¹⁽²⁾, для CH₄ — 1889 ± 2 млрд⁻¹⁽³⁾, а для N₂O — 333,2 ± 0,1 млрд⁻¹. Эти значения составляют соответственно 149, 262 и 123 % по отношению к доиндустриальным уровням (до 1750 года). Увеличение содержания CO₂ в атмосфере с 2019 по 2020 год было незначительно ниже, чем увеличение, наблюдавшееся с 2018 по 2019 год, но более высоким, чем среднегодовые темпы роста, наблюдавшиеся за последнее десятилетие. Все это происходит несмотря на снижение выбросов CO₂ от ископаемого топлива примерно на 5,6 % в 2020 году из-за ограничений, связанных с пандемией COVID-19. Что касается CH₄, его содержание увеличилось с 2019 по 2020 год более значительно, чем за период с 2018 по 2019 год, и, кроме того, данное увеличение превысило среднегодовые темпы роста за последнее десятилетие. Содержание N₂O увеличилось с 2019 по 2020 год более значительно, чем за период с 2018 по 2019 год, при этом данное увеличение также превысило среднегодовые темпы роста за последние 10 лет. Годовой индекс содержания парниковых газов (ГИПГ) Национального управления по исследованию океанов и атмосферы (НУОА) [8] показывает, что в период с 1990 по 2020 год радиационное воздействие долгоживущих парниковых газов (ДПГ) увеличилось на 47 %, при этом на CO₂ приходится около 80 % этого увеличения.

Обзор наблюдений сети ГСА *in situ* за 2020 год

В настоящем семнадцатом ежегодном Бюллетене ВМО по парниковым газам сообщается о содержании в атмосфере важнейших ДПГ — CO₂, CH₄ и N₂O, а также о темпах изменения их содержания, и приводится краткая информация о вкладе в радиационное воздействие на атмосферу других газов. На эти три газа, наряду с дихлордифторметаном ХФУ-12 и трихлорфторметаном ХФУ-11, приходится приблизительно 96 %⁽⁴⁾ радиационного воздействия, обусловленного ДПГ (рисунок 3).

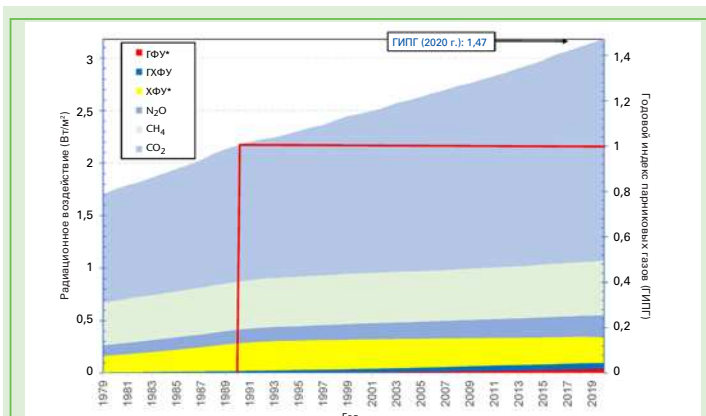


Рисунок 3. Радиационное воздействие ДПГ на атмосферу относительно 1750 г. и обновленный ГИПГ НУОА за 2020 г. [8]. Обратите внимание, что обновленный расчет из доклада Рабочей группы I Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) за 2021 год [9] не был включен в эту оценку. Группа «ХФУ*» также включает в себя другие долгоживущие газы, которые не являются хлорфторуглеродами (ХФУ) (например, CCl₄, CH₃CCl₃ и галоны), однако на ХФУ приходится большая часть (95 % в 2020 году) этого радиационного воздействия. Группа «ГХФУ» включает три наиболее распространенных гидрохлорфторуглерода (ГХФУ): ГХФУ-22, ГХФУ-141b и ГХФУ-142b. Группа «ГФУ*» включает наиболее распространенные гидрофторуглероды (ГФУ) (ГФУ-134a, ГФУ-23, ГФУ-125, ГФУ-143a, ГФУ-32, ГФУ-152a, ГФУ-227ea и ГФУ-365mfc) и гексафторид серы (SF₆) для полноты, хотя на него приходится лишь небольшая часть радиационного воздействия этой группы в 2020 году (13 %).

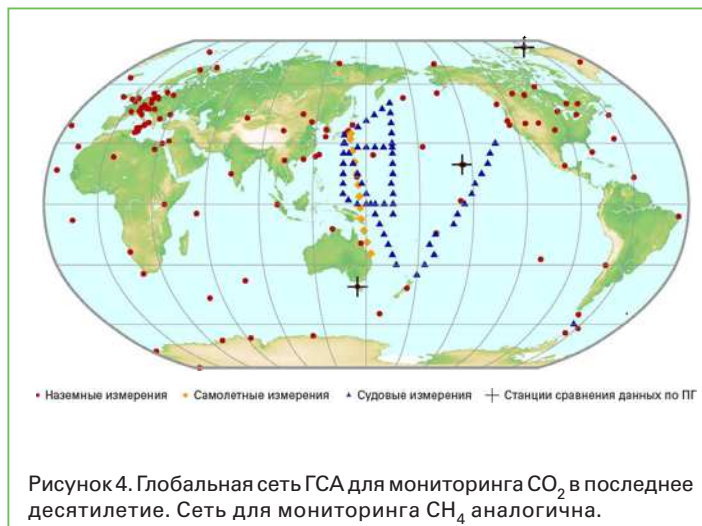


Рисунок 4. Глобальная сеть ГСА для мониторинга CO₂ в последнее десятилетие. Сеть для мониторинга CH₄ аналогична.

В данном бюллетене все процентные вклады в радиационное воздействие, рассчитанные по методологии, изложенной в [8], используют 1750 год в качестве базисного периода и включают только ДПГ.

Программа ГСА ВМО координирует систематические наблюдения и анализы ПГ и других малых газовых составляющих в атмосфере. Пункты, на которых в последнее десятилетие осуществляется измерение ПГ, показаны на рисунке 4. Данные измерений сообщаются участвующими странами, архивируются и распространяются Мировым центром данных по парниковым газам (МЦДПГ) ВМО, находящимся в Японском метеорологическом агентстве.

Представленные здесь результаты МЦДПГ по глобальному среднему значению и темпам роста несколько отличаются от результатов, сообщаемых НУОА за те же годы [10], по причине различий в используемых станциях, различий в процедуре усреднения и небольших различий в периоде времени, для которого эти значения репрезентативны. МЦДПГ следует процедуре, описанной в Отчете ГСА № 184 [11]. Представленные здесь результаты, касающиеся CO₂, несколько отличаются от описанных в предыдущих Бюллетенях по парниковым

Таблица. Глобальное среднегодовое приземное содержание (2020 г.) и тренды важнейших ПГ по данным глобальной сети наблюдений ГСА *in situ*. Единицы измерения — молярные доли в сухом воздухе, а погрешности определены на уровне доверительного интервала, составляющего 68 %. Метод усреднения описан в Отчете ГСА № 184 [11].

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Глобальное содержание в 2020 г.	413,2±0,2 млн ⁻¹	1889±2 млрд ⁻¹	333,2±0,1 млрд ⁻¹
Содержание 2020 г. относительно 1750 г. ^a	149%	262%	123%
Абсолютное увеличение в 2019—2020 гг.	2,5 млн ⁻¹	11 млрд ⁻¹	1,2 млрд ⁻¹
Абсолютное увеличение в 2019—2020 гг.	0,61%	0,59%	0,36%
Среднее годовое абсолютное увеличение за последние 10 лет	2,40 млн ⁻¹ /год	8,0 млрд ⁻¹ /год	0,99 млрд ⁻¹ /год

^a Исходя из предположения о том, что в доиндустриальный период молярная доля CO₂ составляла 278 млн⁻¹, CH₄ — 722 млрд⁻¹, а N₂O — 270 млрд⁻¹. Число станций, данные которых использовались для анализа, составляет 139 для CO₂, 138 для CH₄ и 105 для N₂O.

CarbonWatchNZ: использование долгосрочных измерений атмосферного CO₂ для лучшего понимания поглощения углерода лесами Новой Зеландии

В Новой Зеландии леса компенсируют 30 % выбросов парниковых газов, однако точные оценки поглощения углерода лесами остаются весьма неопределенными. В национальном докладе о кадастре (НДК), который отслеживает прогресс в достижении целевых показателей выбросов в рамках Рамочной конвенции об изменении климата ООН (РКИК ООН), для оценки поглощения углерода лесами используются измерения диаметра и высоты деревьев в национальной сети станций [25]. Этот подход соответствует руководящим принципам передовых международных практик [26], однако может и не отражать все процессы лесной экосистемы в достаточной степени.

Независимые оценки, полученные в результате атмосферных измерений CO₂ и моделирования, свидетельствуют о том, что поглощение углерода лесами может быть значительно недооценено как со стороны НДК, так и в процессе моделирования земной биосферы [27]. Самые последние результаты подтверждают наличие данного поглотителя выбросов с помощью дополнительных измерений и моделирования и указывают на то, что описанный процесс поглощения продолжается по крайней мере в течение десятилетия (рисунок 10).

Данный процесс дополнительного поглощения углерода происходит в одном из самых маловероятных мест: на юго-западе Южного острова, в регионе, где преобладают многолетние коренные леса (рисунок 11). Долгое время считалось, что коренные леса Новой Зеландии поглощают меньше углерода, чем лесопосадки, которые преимущественно состоят из быстрорастущих экзотических деревьев. Эти результаты могут привести к открытию нового, более устойчивого способа управления национальными лесами

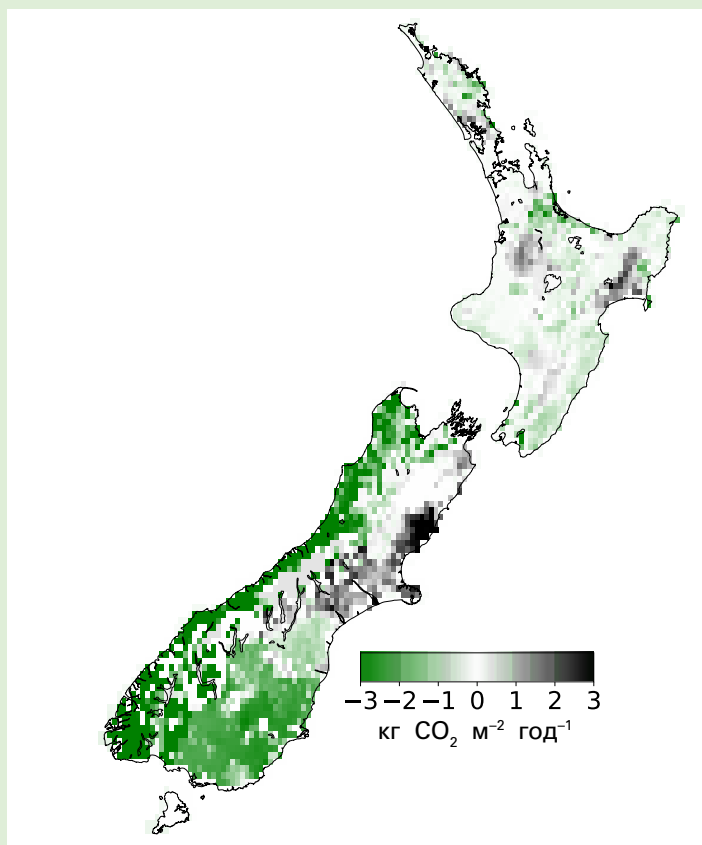


Рисунок 11. Среднее поглощение земной биосферой Новой Зеландии в период с 2011 по 2020 год, оцененное на основании атмосферных измерений и моделирования.

для поглощения углерода с многочисленными сопутствующими экологическими выгодами [27].

Недавно Комиссия по изменению климата Новой Зеландии рекомендовала стране перейти от лесоразведения к посадке местных лесов для поглощения углерода. Однако о чувствительности уникальных коренных лесов Новой Зеландии к будущим изменениям климата известно мало.

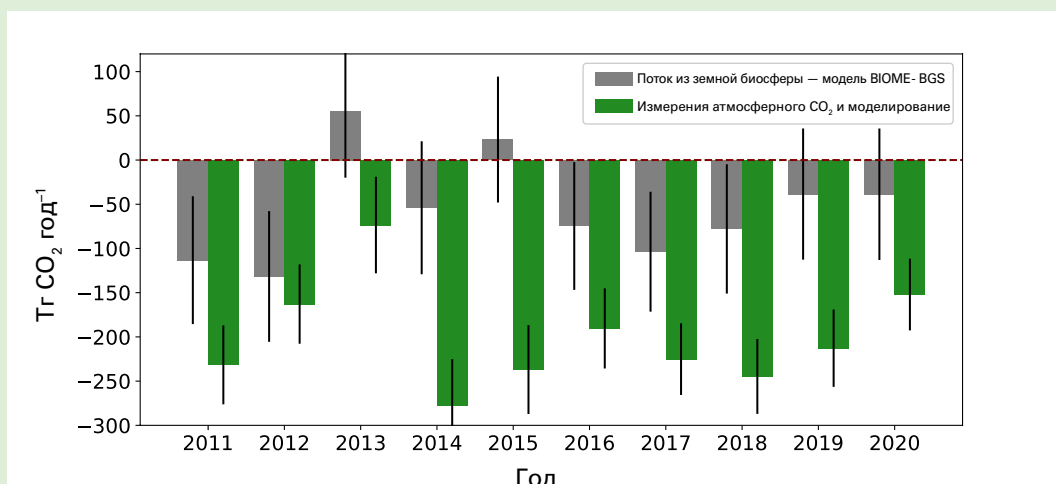


Рисунок 10. Среднегодовой поток углерода из земной биосферы Новой Зеландии, рассчитанный по модели Biome-BGC (серый цвет) и по результатам измерений и моделирования атмосферного CO₂ (зеленый цвет) [27].

Наблюдения проясняют углеродный цикл тропических регионов: Амазония как чистый источник CO₂

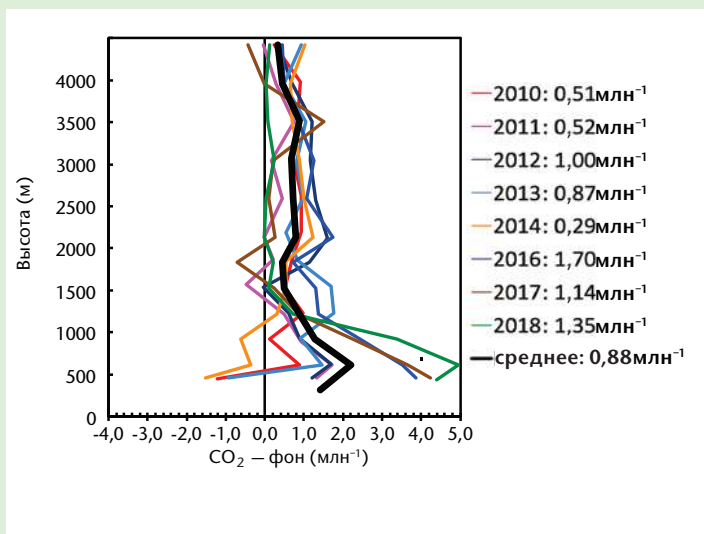


Рисунок 12. Среднегодовые вертикальные профили в пункте самолетных измерений ALF в Бразилии [28].

Продолжающиеся измерения поспособствуют пониманию того, насколько чувствительны эти леса к изменению климата и как осуществляемый ими процесс поглощения углерода будет реагировать на меняющийся мир.

Тропические регионы, такие как Амазония, играют важную роль в глобальном балансе углерода. В Амазонии расположен самый большой тропический лес Земли, но, как и в других тропических регионах, здесь производится лишь небольшое количество наблюдений *in situ*, необходимых для определения крупномасштабных потоков углерода. Для улучшения оценки вклада Амазонии в глобальный углеродный бюджет, в 2010 году была запущена программа

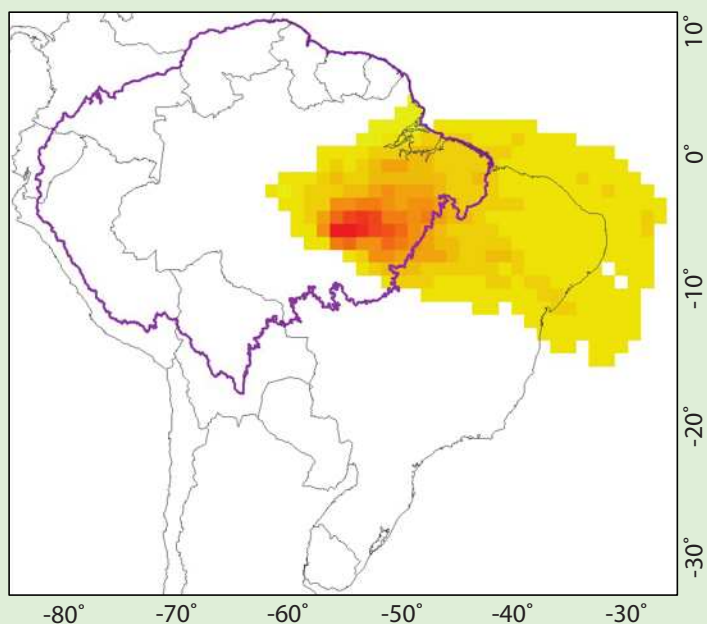


Рисунок 13. Зона охвата пункта самолетных измерений ALF (усредненная площадь в период с 2010 по 2018 гг.).

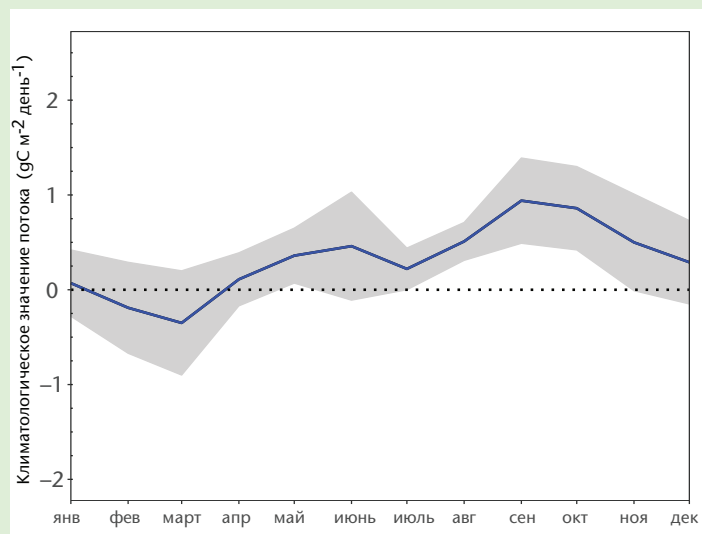


Рисунок 14. Осредненные за период измерения среднемесячные значения потоков углерода ALF в течение 2010–2018 гг. Серая зона отражает стандартное отклонение среднемесячных значений, а сплошная линия показывает среднее 9-летнее климатологическое значение потока углерода в юго-восточной Амазонии [28].

самолетных измерений в четырех различных пунктах этого региона: Альта Флореста (ALF), Рио Бранко (RBA), Сантарем (SAN) и Табатинга/Тефе (TAB/TEF). Вертикальные профили простираются от поверхности до примерно 4,5 км над уровнем моря, а собранные данные отражают баланс поверхностного потока на значительной части Амазонии (около 80 % южноамериканской Амазонии). В целом, за период с 2010 по 2018 год было собрано 600 вертикальных профилей самолетных измерений CO₂ и CO [28].

Среднегодовые вертикальные профили изображены на рисунке 12. Юго-восточный регион, исследуемый пунктом ALF (8,80° ю. ш., 56,75° з. д; см. рисунок 13), характеризуется наибольшим объемом выбросов CO₂ в атмосферу (рисунок 14), опережая при этом северо-восточный регион. В свою очередь, вертикальные градиенты западных пунктов (не изображены на рисунке) свидетельствуют о практически нейтральном углеродном балансе или наличии поглотителей углерода. Градиенты CO₂ по среднегодовым вертикальным профилям и расчетным потокам углерода для этих пунктов указывают на то, что в районах, в большей степени затронутых изменениями в землепользовании и почвенно-растительном покрове, наблюдаются более высокие выбросы углерода в атмосферу. В регионах на востоке Амазонии отмечается значительное повышение температуры в сухой сезон, уменьшение количества осадков и существенное историческое обезлесение на протяжении последних 40 лет, в то время как в западных регионах наблюдается относительно низкий уровень антропогенного воздействия и относительно слабые тенденции изменения климата в сухой сезон.

газам (примерно на $0,2 \text{ млн}^{-1}$), поскольку теперь данные представлены по новой шкале калибровки CO_2 , ВМО CO_2 X2019 [12]. Исторические данные были переведены в новую шкалу для обеспечения согласованности представленных тенденций.

В таблице приведены глобально усредненные атмосферные содержания трех основных ДПГ в 2020 году и изменение их содержания с 2019 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 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. ИГИСПГ предоставляет дополнительную информацию об источниках ПГ на национальном и субнациональном уровнях.

ГИПГ НУОА измеряет увеличение общего радиационного воздействия всех ДПГ с 1990 года [8]. В 2020 году ГИПГ НУОА достиг 1,47, что указывает на увеличение общего радиационного воздействия на 47 % с 1990 до 2020 года и на 1,8 % — с 2019 по 2020 год (рисунок 3). Общее радиационное воздействие всех ДПГ в 2020 году ($3,18 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$) соответствует молярной доле эквивалента CO_2 , составляющей 504 млн^{-1} . Относительные вклады других газов в общее радиационное воздействие после доиндустриального периода представлены на рисунке 5.

Диоксид углерода (CO_2)

Диоксид углерода является единственным наиболее важным антропогенным ПГ в атмосфере, доля которого в радиационном воздействии ДПГ составляет приблизительно 66 %⁽⁴⁾. Его вклад в увеличение радиационного воздействия за последнее десятилетие составляет ~82 %⁽⁴⁾ и также ~82 % за последние пять лет. Доиндустриальный уровень, составлявший ~278 млн^{-1} , отражал баланс потоков между атмосферой, океанами и биосферой суши. Глобально усредненная молярная доля CO_2 в 2020 году составила $413,2 \pm 0,2 \text{ млн}^{-1}$ (рисунок 6). Увеличение среднегодовых значений с 2019 по 2020 год ($2,5 \text{ млн}^{-1}$) было незначительно ниже, чем увеличение с 2018 по 2019 год, но

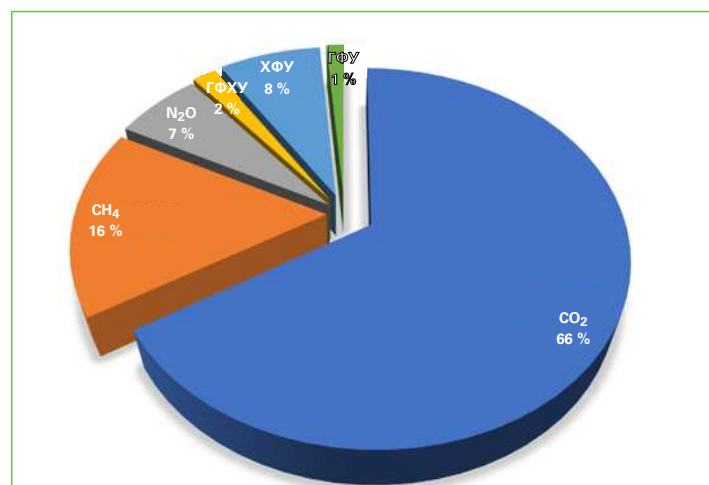


Рисунок 5. Вклад наиболее важных ДПГ в увеличение глобального радиационного воздействия, обусловленного этими газами, после доиндустриальной эпохи до 2020 года [8].

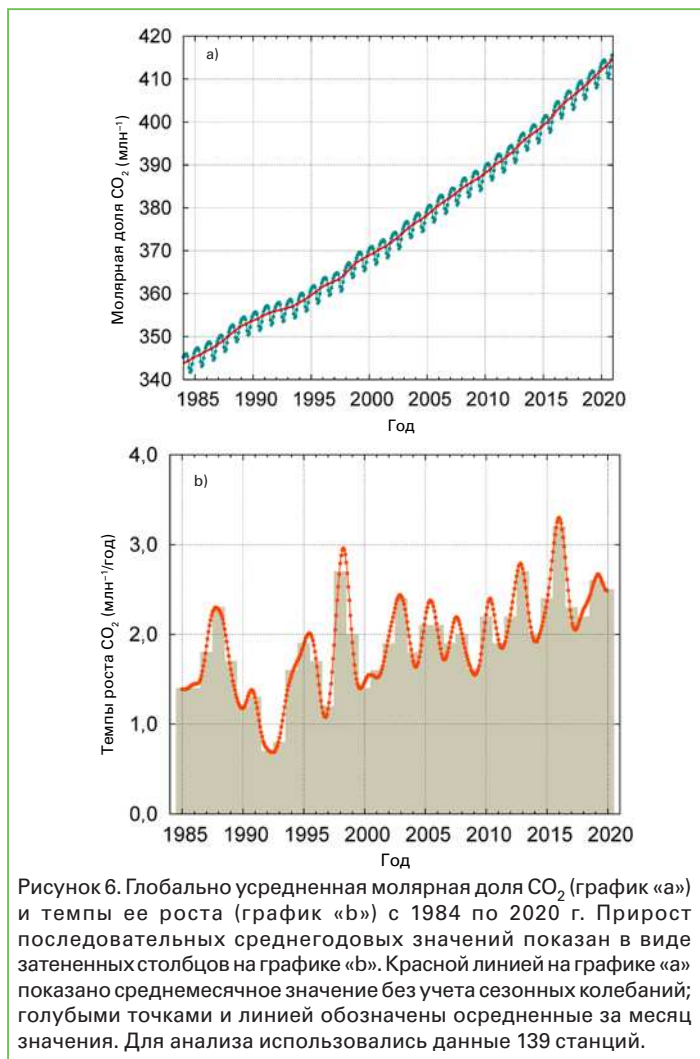


Рисунок 6. Глобально усредненная молярная доля CO_2 (график «а») и темпы ее роста (график «б») с 1984 по 2020 г. Прирост последовательных среднегодовых значений показан в виде затененных столбцов на графике «б». Красной линией на графике «а» показано среднемесячное значение без учета сезонных колебаний; голубыми точками и линией обозначены осредненные за месяц значения. Для анализа использовались данные 139 станций.

незначительно выше, чем средний темп роста за последнее десятилетие ($2,40 \text{ млн}^{-1}/\text{год}$), несмотря на примерно 5,6 %-ное снижение выбросов CO_2 от ископаемого топлива в 2020 году из-за ограничений, связанных с пандемией COVID-19 [13]. Обратите внимание, что среднее значение приземного содержания CO_2 за 2019 год, указанное в шестнадцатом Бюллетене по парниковым газам, было скорректировано с $410,5 \text{ млн}^{-1}$ до $410,7 \text{ млн}^{-1}$ в связи с переходом всех представленных значений на новую шкалу калибровки CO_2 , X2019 [12].

В 2020 году атмосферный CO_2 достиг 149 % от доиндустриального уровня, главным образом из-за выбросов от сжигания ископаемого топлива и производства цемента. По данным Международного энергетического агентства, выбросы CO_2 от ископаемого топлива достигнут $31,5 \text{ ГтCO}_2$ ⁽⁵⁾ в 2020 году по сравнению с $33,4 \text{ ГтCO}_2$ в 2019 году [14]. Согласно анализу Глобального углеродного проекта за 2020 год, вырубка лесов и другие изменения в землепользовании оказали влияние на показатель, равный $5,7 \text{ ГтCO}_2/\text{год}$ (в среднем за 2010—2019 годы). Из всего объема выбросов в результате человеческой деятельности в период с 2010 по 2019 год около 46 % аккумулировалось в атмосфере, 23 % — в океане и 31 % — на суше; с неучтенным дисбалансом бюджета равным $0,4 \text{ %}$ [15]. 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).

Метан (CH_4)

Доля метана в радиационном воздействии ДПГ составляет около 16 %⁽⁴⁾. Приблизительно 40 % метана поступает в атмосферу из естественных источников (например, водно-болотные угодья

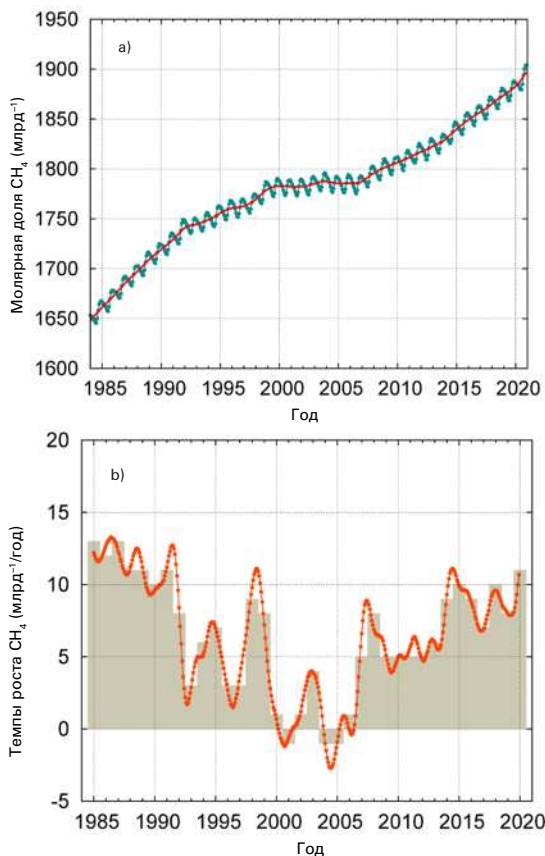


Рисунок 7. Глобально усредненная молярная доля CH_4 (график «а») и темпы ее роста (график «б») с 1984 по 2020 г. Прирост последовательных среднегодовых значений показан в виде затененных столбцов на графике «б». Красной линией на графике «а» показано среднеемесячное значение без учета сезонных колебаний; голубыми точками и линией обозначены осредненные за месяц значения. Для анализа использовались данные 138 станций.

и термитники) и около 60 % — из антропогенных (например, жизнедеятельность жвачных животных, выращивание риса, использование ископаемого топлива, захоронение отходов и сжигание биомассы) [16]. Глобально усредненная доля CH_4 , рассчитанная на основании наблюдений *in situ*, достигла в 2020 году нового максимума, составившего 1889 ± 2 млрд⁻¹, что является увеличением на 11 млрд⁻¹ по отношению к предыдущему году (рисунок 7). Эта величина выше величины 8 млрд⁻¹, зафиксированной с 2018 по 2019 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 и в 2020 году достигло 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 эмиссии CH_4 из болот в тропиках и выбросов из антропогенных источников в средних широтах Северного полушария.

В ряде недавних исследований указывалось на краткосрочные климатические выгоды и экономическую рентабельность предотвращения выбросов CH_4 [17]. Некоторые меры по смягчению последствий представлены в оценке метана в рамках Программы ООН по окружающей среде (ЮНЕП) [18].

Закись азота (N_2O)

Доля закиси азота в радиационном воздействии ДПГ составляет около 7 %⁽⁴⁾. Это третий наиболее важный ДПГ по своему вкладу в общее радиационное воздействие. Закись азота поступает в атмосферу как из естественных (около 60 %), так и

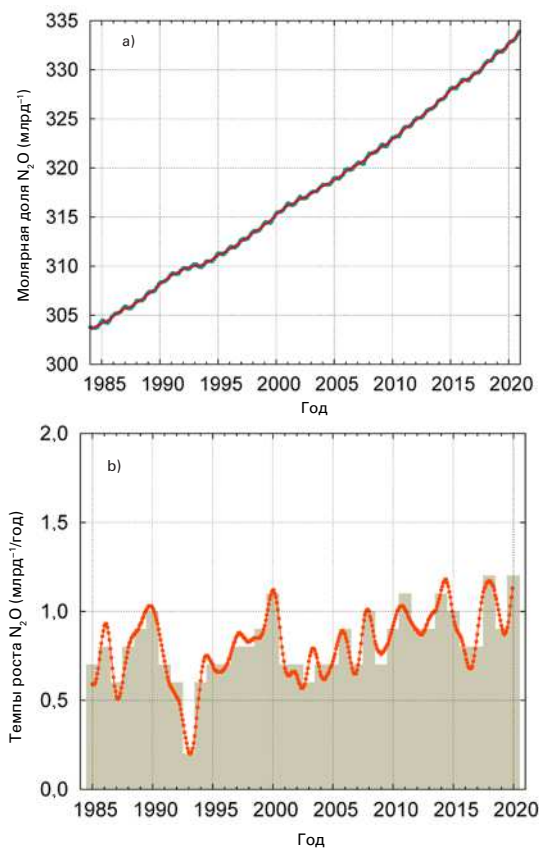


Рисунок 8. Глобально усредненная молярная доля N_2O (график «а») и темпы ее роста (график «б») с 1984 по 2020 г. Прирост последовательных среднегодовых значений показан в виде затененных столбцов на графике «б». Красной линией на графике «а» показано среднеемесячное значение без учета сезонных колебаний; на данном графике она совпадает с голубыми точками и линией, обозначающими осредненные за месяц значения. Для анализа использовались данные 105 станций.

из антропогенных источников (приблизительно 40 %), включая океаны, почву, сжигание биомассы, использование удобрений и различные промышленные процессы. Глобально усредненная молярная доля N_2O в 2020 году достигла $333,2 \pm 0,1$ млрд⁻¹, что на 1,2 млрд⁻¹ выше показателя предыдущего года (рисунок 8) и на 123 % выше доиндустриального уровня (270 млрд⁻¹). Годовое увеличение с 2019 по 2020 год было более значительным, чем увеличение в период с 2018 по 2019 год, а также более значительным, чем средние темпы роста за последние 10 лет (0,99 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. Вследствие использования азотных удобрений и навоза, на долю сельского хозяйства приходится 70 % всех антропогенных выбросов N_2O . Этим увеличением в основном объясняется рост атмосферной нагрузки N_2O .

Другие парниковые газы

Вклад 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 %⁽⁴⁾. Хотя содержание ХФУ и большинства галонов сокращается, содержание в атмосфере ГХФУ и ГФУ, которые также являются мощными ПГ, увеличивается относительно быстрыми темпами, однако их общее содержание по-прежнему сохраняется на низком уровне (на уровне трлн⁻¹ ⁽⁶⁾). Существующая сеть наблюдений за ХФУ недостаточна для своевременного определения важных источников выбросов [20]. Несмотря на такое же низкое содержание, SF_6 является чрезвычайно мощным ДПГ. Он

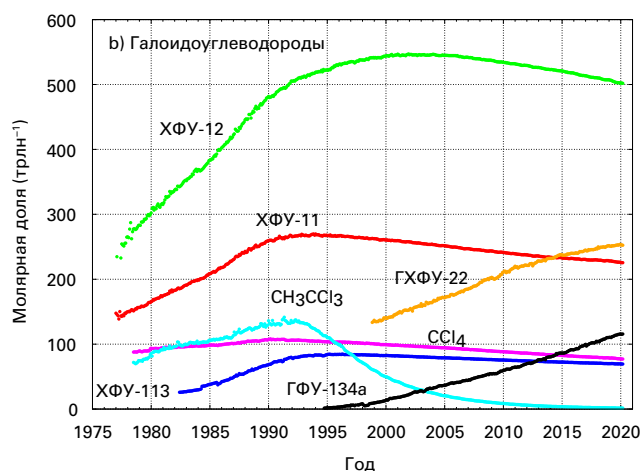
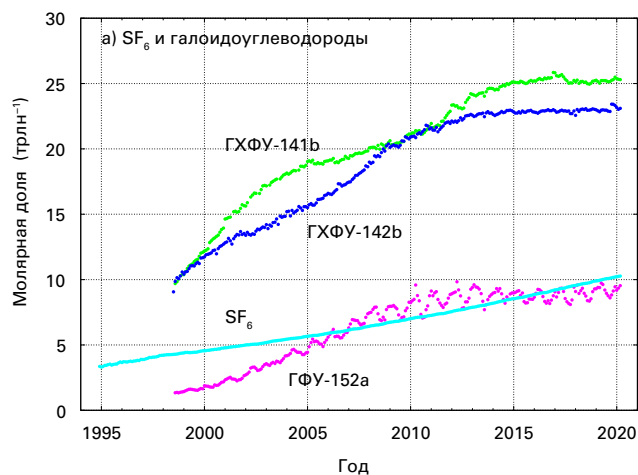


Рисунок 9. Среднемесячная молярная доля SF₆ и наиболее важных галоидоуглеродов: SF₆ и галоидоуглероды с низкой молярной долей (график «а») и галоидоуглероды с высокой молярной долей (график «б»). Число станций, использованных для анализа: SF₆ (88), ХФУ-11 (23), ХФУ-12 (25), ХФУ-113 (22), CCl₄ (22), CH₃CCl₃ (25), ГХФУ-141b (10), ГХФУ-142b (15), ГХФУ-22 (14), ГФУ-134a (11) и ГФУ-152a (10).

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 рассматриваются главным образом ДПГ. Радиационное воздействие относительно короткоживущего тропосферного озона сопоставимо с радиационным воздействием галогенуглеродов [21]. Многие другие загрязнители, такие как окись углерода (CO), оксиды азота и летучие органические соединения, хотя они и не относятся к ПГ, оказывают небольшое прямое или косвенное влияние на радиационное воздействие [9]. 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 [22].

Выражение признательности и ссылки

Пятьдесят пять Членов ВМО внесли свой вклад в форме предоставления данных о CO₂ и других ПГ в МЦДПГ ГСА. Приблизительно 40 % данных измерений, переданных в МЦДПГ, было собрано на станциях совместной сети отбора проб воздуха Научной лаборатории НУОА по глобальному мониторингу. Данные по другим сетям и станциям см. в Отчете ГСА № 255 [23]. 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 (см. рисунок 4), включены в список станций, внесших вклад в подготовку бюллетеня, на веб-странице МЦДПГ (<https://gaw.kishou.go.jp>). Они также описаны в Системе информации о станциях ГСА (СИСГСА) (<http://gawsis.meteoswiss.ch>), которая получает поддержку со стороны Метеорологической службы Швейцарии. Подготовку Бюллетеня курировала Научная консультативная группа ГСА по парниковым газам.

Редакционный совет

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

Луана Бассо (Национальный институт космических исследований, Бразилия), Энди Кротвелл (Лаборатория глобального мониторинга НУОА и Объединенный институт исследований в области наук об окружающей среде, Университет штата Колорадо в Боулдере, США), Хан Долман (Амстердамский свободный университет, Нидерланды), Лусиана Гатти (Национальный институт космических исследований, Бразилия), Кристоф Гербиг (Институт биогеохимии им. Макса Планка, Германия), Дэвид Гриффит (Университет Вуллонгонга, Австралия), Брэдли Холл (Лаборатория глобального мониторинга НУОА, США), Армин Джордан (Институт биогеохимии им. Макса Планка, Германия), Пол Крюммель (Организация по научным и промышленным исследованиям для стран Содружества, Австралия), Маркус Лойенбергер (Университет Берна, Швейцария), Зои Лох (Организация по научным и промышленным исследованиям для стран Содружества, Австралия), Сара Микалофф-Флетчер (ГНС Наука, Манааки Венуа — Исследования в области ухода за землей и Университет Вайкато, Новая Зеландия), Юсуке Сава (Японское метеорологическое агентство, МЦДПГ, Япония), Майкл Шибиг (Университет Берна, Швейцария), Оксана Тарасова (ВМО), Джослин Тернбулл (ГНС Наука, Новая Зеландия/Объединенный институт исследований в области наук об окружающей среде, Университет штата Колорадо в Боулдере, США), Алекс Вермойлен (ИКОС ЕКИИ/Лундский университет, Швеция).

Ссылки

- [1] Bennedsen, M., E. Hillebrand and S.J. Koopman, 2019: Trend analysis of the airborne fraction and sink rate of anthropogenically released CO₂. *Biogeosciences*, 16: 3651–3663, <https://doi.org/10.5194/bg-16-3651-2019>.
- [2] Ciavarella, A. et al., 2021: Prolonged Siberian heat of 2020 almost impossible without human influence. *Climatic Change*, 166: 9, <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03052-w>.
- [3] Jiang, L.Q., et al., 2019. Surface ocean pH and buffer capacity: past, present and future. *Scientific Reports*, 9: 18624, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55039-4>.
- [4] Caesar, L. et al., 2021: Current Atlantic Meridional Overturning Circulation weakest in last millennium. *Nature Geoscience*, 14: 118–120, <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00699-z>.
- [5] Manning, A. and R.F. Keeling, 2006: Global oceanic and land biotic carbon sinks from the Scripps atmospheric oxygen flask sampling network. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 58(2): 95–116, <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2006.00175.x>.
- [6] GCOS, 2021: The Status of the Global Climate Observing System 2021: *The GCOS Status Report*, (GCOS-240), WMO, Geneva.

- [7] Schibig, M.F., 2015: Carbon and oxygen cycle related atmospheric measurements at the terrestrial background station Jungfraujoch. PhD thesis, University of Bern.
- [8] Butler, J.H. and S.A. Montzka, 2020: The NOAA Annual Greenhouse Gas Index (AGGI). NOAA, Earth System Research Laboratories, Global Monitoring Laboratory, <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.html>.
- [9] IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (V. Masson-Delmotte et al., eds.). Cambridge University Press, <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/>.
- [10] NOAA, Earth System Research Laboratories, Global Monitoring Laboratory, 2020: Trends in atmospheric carbon dioxide, <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>.
- [11] Tsutsumi, Y. et al., 2009: *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. Geneva, WMO, https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=12631.
- [12] Hall, B.D. et al., 2021: Revision of the World Meteorological Organization Global Atmosphere Watch (WMO/GAW) CO₂ calibration scale. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14: 3015–3032, <https://doi.org/10.5194/amt-14-3015-2021>.
- [13] Le Quéré, C. et al., 2020: Temporary reduction in daily global CO₂ emissions during the COVID-19 forced confinement. *Nature Climate Change*, 10: 647–653, <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0797-x>.
- [14] International Energy Agency, 2021: Global energy review: CO₂ emissions in 2020, <https://www.iea.org/articles/global-energy-review-co2-emissions-in-2020>.
- [15] Friedlingstein, P. et al., 2020: Global Carbon Budget 2020. *Earth System Science Data*, 12(4): 3269–3340, <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>.
- [16] Saunio, M. et al., 2020: The Global Methane Budget 2000–2017. *Earth System Science Data*, 12(3): 1561–1623, <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>.
- [17] Nisbet, E.G. et al., 2020: Methane mitigation: methods to reduce emissions, on the path to the Paris Agreement. *Reviews of Geophysics*, 58(1): e2019RG000675, <https://doi.org/10.1029/2019RG000675>.
- [18] UNEP and Climate and Clean Air Coalition, 2021: *Global Methane Assessment: Benefits and Costs of Mitigating Methane Emissions*. Nairobi, UNEP, <https://www.unep.org/resources/report/global-methane-assessment-benefits-and-costs-mitigating-methane-emissions>.
- [19] Tian, H. et al., 2020: A comprehensive quantification of global nitrous oxide sources and sinks. *Nature*, 586: 248–256, <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2780-0>.
- [20] Weiss, R.F., A.R. Ravishankara and P.A. Newman, 2021: Huge gaps in detection networks plague emissions monitoring. *Nature*, 595: 491–493, <https://doi.org/10.1038/d41586-021-01967-z>.
- [21] WMO, 2018: *WMO Reactive Gases Bulletin: Highlights from the Global Atmosphere Watch Programme*, No. 2, https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=20667#YWCnpbj0njZ.
- [22] WMO, 2021: *WMO Air Quality and Climate Bulletin*, No. 1, https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=21942.
- [23] WMO, 2020: *20th WMO/IAEA Meeting on Carbon Dioxide, Other Greenhouse Gases and Related Measurement Techniques* (GGMT-2019). GAW Report No. 255. Geneva, https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10353.
- [24] Henne, S. et al., 2008: Mount Kenya Global Atmosphere Watch station (MKN): installation and meteorological characterization. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(11): 2946–2962, <https://doi.org/10.1175/2008jamc1834.1>.
- [25] New Zealand Ministry for the Environment, 2021: *New Zealand's Greenhouse Gas Inventory 1990–2019* Wellington, <https://environment.govt.nz/publications/new-zealands-greenhouse-gas-inventory-1990-2019/>.
- [26] IPCC, 2019: 2019 *Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>.
- [27] Steinkamp, K. et al., 2017: Atmospheric CO₂ observations and models suggest strong carbon uptake by forests in New Zealand. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(1): 47–76, <https://acp.copernicus.org/articles/17/47/2017/>.
- [28] Gatti, L.V. et al., 2021: Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. *Nature*, 595: 388–393, <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03629-6>.

Контакты

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

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

Примечания:

- (1) 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
- (2) млн⁻¹ = число молекул газа на миллион (10⁶) молекул сухого воздуха
- (3) млрд⁻¹ = число молекул газа на миллиард (10⁹) молекул сухого воздуха
- (4) Эта процентная доля рассчитывается как относительный вклад вышеупомянутого(ых) газа(ов) в повышение глобального радиационного воздействия, вызванного всеми ДПГ с 1750 года. 1 ГтCO₂ = 1 миллиард (10⁹) метрических тонн диоксида углерода
- (5) трлн⁻¹ = число молекул газа на триллион (10¹²) молекул сухого воздуха
- (6)

Отдельные обсерватории для мониторинга парниковых газов

Гора Кения (MKN)



Фото: ВМО

Пункт ГСА Гора Кения (идентификатор станции MKN) расположен на северо-западном склоне горы Кения рядом с маршрутом Сиримон, примерно в 5 км к юго-западу и на 200 м ниже холма Тимау [24]. Он находится в ведении Метеорологической службы Кении, в городе Найроби. Миссия станции заключается в осуществлении долгосрочных измерений ПГ и аэрозолей в экваториальной Африке и оценке вклада сельскохозяйственного пала и деятельности по вырубке лесов в накопление озона в регионе. Гора Кения — это изолированная почти коническая гора вулканического происхождения, которая умеренно возвышается над окружающим предгорьем (1800—2000 метров над уровнем моря) примерно до 4300 метров над уровнем моря. Эта территория охраняется с 1949 года как часть Национального парка горы Кения, а в 1997 году она была включена в список Всемирного наследия.

Станция была спроектирована как мобильное двухконтейнерное здание, которое было полностью оборудовано и введено в эксплуатацию в Германии Институтом метеорологии и исследования климата — Исследования атмосферы и окружающей среды (Forschungszentrum Karlsruhe (FZK)). Здание было отправлено в Кению как единое целое. Официальное открытие станции состоялось в октябре 1999 года. Отбор проб воздуха начался совместно с Лабораторией глобального мониторинга для анализа CO, CO₂, N₂O, CH₄, H₂, SF₆ и изотопов водорода и кислорода НУОА. Калибровка приборов проводится раз в два года Швейцарской федеральной лабораторией по испытанию и исследованию материалов (ЕМПА). Электроэнергия на станцию подается по 26-километровой наземной линии электропередачи, проходящей через тропический лес.



Местоположение

Страна: Кения
Широта: 0,0622° ю. ш.
Долгота: 37,2922° в. д.
Высота: 3644,00 метра над уровнем моря
Часовой пояс: местное время = UTC +3 часов

Барроу (BRW)

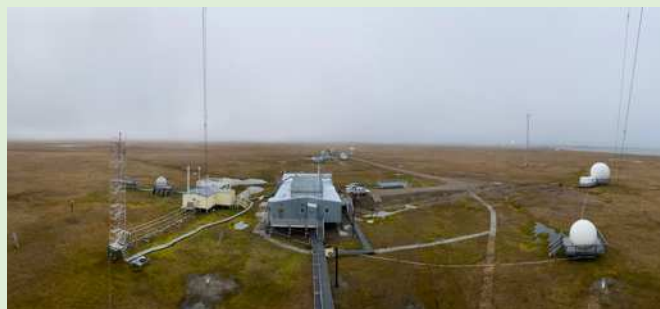


Фото: НУОА

Базовая атмосферная обсерватория Барроу (BRW), официально созданная в 1973 году, является самой северной станцией НУОА и самой продолжительной непрерывно действующей обсерваторией атмосферного климата в Арктике. Расположенный в 8 км к северо-востоку от города Уткиагвик (бывший Барроу), Аляска, BRW специально установлен в точке, препятствующей потоку воздуха от населенных пунктов, в изолированном районе, что позволяет проводить мониторинг воздуха, который не подвергся воздействию региональных источников загрязнения.

Оригинальное здание обсерватории площадью 74 м² было построено в 1973 году, и за время его существования в нем проводились многочисленные долгосрочные климатические измерения и эксперименты. Спустя 47 лет это сооружение перестало удовлетворять потребностям исследователей и в 2020 году было заменено новым главным зданием площадью 273 м², а также вспомогательными сооружениями. Новый объект оснащен палубой на крыше, 30-метровой приборной башней, научной платформой кампании, вмещающей два 6-метровых металлических грузовых контейнера, и высокоскоростными оптоволоконными соединениями с близлежащим оборудованием Соединенных Штатов, которое было перевезено в новое здание в конце 2020 года. На сегодняшний день BRW поддерживает более 200 измерений, позволяющих проводить исследования состава атмосферы, климата, солнечной радиации, аэрозолей и стратосферного озона.



Местоположение

Страна: США
Широта: 71,323° с. ш.
Долгота: 156,611° з. д.
Высота: 11,00 метров над уровнем моря
Часовой пояс: местное время = UTC – 9 часов