



БЮЛЛЕТЕНЬ ВМО ПО КАЧЕСТВУ ВОЗДУХА И КЛИМАТУ

Введение

Продолжающееся изменение климата, вызванное накоплением парниковых газов в атмосфере, длится от нескольких десятилетий до столетий и является причиной изменений окружающей среды по всему миру. Последствия загрязнения воздуха, напротив, проявляются вблизи поверхности Земли в сроки от нескольких дней до нескольких недель, а их пространственные масштабы варьируются от местных (например, городские центры, см. фото ниже) до региональных. Несмотря на эти существенные различия, качество воздуха и изменения климата тесно взаимосвязаны (Fiore et al., 2012; West et al., 2013; IPCC, 2021). В новом *Бюллетене ВМО по качеству воздуха и климату* будет ежегодно публиковаться информация о состоянии качества воздуха и его связи с изменениями климата, учитывающая географическое распределение традиционных загрязняющих веществ и происходящие с ними изменения.

Традиционные загрязнители включают в себя короткоживущие химически активные газы, такие как озон — малая газовая составляющая, одновременно являющаяся распространенным традиционным загрязнителем и парниковым газом, нагревающим атмосферу, и твердые частицы — широкий спектр взвешенных в атмосфере мельчайших частиц (их обычно называют аэрозолями), которые пагубно воздействуют на здоровье человека и в силу своих комплексных характеристик могут как охлаждать, так и нагревать атмосферу.

Качество воздуха и климат взаимосвязаны, поскольку связаны влияющие на них химические соединения, и, если изменения происходят в одном, они неизбежно влекут изменения и в другом. Деятельность человека, приводящая к выбросу долгоживущих парниковых газов в атмосферу, также усиливает концентрацию короткоживущего озона и твердых частиц в атмосфере. Например, при сжигании ископаемых видов топлива (основного источника диоксида углерода (CO_2)) в атмосферу также выделяется оксид азота (NO), что может привести к фотохимическому образованию¹ озона и нитратных аэрозолей. Аналогичным образом, в результате сельскохозяйственной деятельности (которая

является основным источником парникового газа метана) происходит выброс аммиака, который затем образует аэрозоли аммиака (Pye et al., 2009).

Таким образом, политические изменения, направленные на улучшение качества воздуха, влияют на политику по ограничению изменений климата, и наоборот. Например, резкое сокращение сжигания ископаемых видов топлива с целью сократить выбросы парниковых



На фото военный мемориал «Ворота Индии» 17 октября 2019 года (вверху) и после того, как уровни загрязнения воздуха начали снижаться во время 21-дневного общенационального режима изоляции в Нью-Дели, Индия, 8 апреля 2020 года (внизу). Как поясняется в этом Бюллетене, повышение качества воздуха может быть связано со многими процессами, в том числе и с сокращением выбросов и изменениями метеорологических условий. Источник: Рейтерс/Ануши Фаднавис/Аднан Абиди

¹ Фотохимическое образование — это химическая реакция формирования молекулы в присутствии света.

газов также сократит и количество связанных с этой деятельностью загрязнителей атмосферы, таких как озон и нитратные аэрозоли. Политика по уменьшению загрязнения твердыми частицами с целью защиты здоровья человека может устранить охлаждающий эффект сульфатных аэрозолей или согревающий эффект черного углерода (частиц сажи). Наконец, изменения климата могут напрямую влиять на уровни загрязнения. Например, увеличение частоты и интенсивности волн тепла может привести к дополнительному накоплению загрязняющих веществ вблизи поверхности Земли.

Этот выпуск *Бюллетеня ВМО по качеству воздуха и климату* содержит последнюю информацию о глобальном распределении твердых частиц, при этом особое внимание уделено вкладу в него экстремальных лесных пожаров, произошедших в 2020 году. 2020 год был также отмечен распространением нового коронавируса (SARS-CoV-2), который вызывает респираторное заболевание, известное как COVID-19. Последовавшая за этим пандемия COVID-19 в 2020 году вызвала всемирный экономический спад, который привел к сокращению выбросов загрязняющих воздух веществ, что в свою очередь оказало ряд воздействий на уровни озона и твердых частиц у поверхности Земли и в свободной тропосфере² (Gkatzelis et al., 2021; Steinbrecht et al., 2021). В этом Бюллетене приводится обзор многих новых и важных научных результатов исследований влияния пандемии COVID-19 на качество воздуха по всему миру, полученных с помощью долгосрочных измерений на нескольких станциях Глобальной службы атмосферы ВМО (ГСА). В конце представлены последние обновленные данные о том, как длительное воздействие загрязнения озоном и твердыми частицами влияет на здоровье человека на глобальном уровне.

Глобальный уровень концентрации твердых частиц в 2020 году, зарегистрированный Службой мониторинга атмосферы в рамках программы «Коперник»

Вдыхание твердых частиц размером менее 2,5 микрон (класс $PM_{2.5}$) в течение длительного времени представляет серьезную опасность для здоровья. На глобальном уровне деятельность человека и природные источники вносят вклад в загрязнение частицами $PM_{2.5}$ в различных пропорциях. На рисунке 1, сделанном с использованием данных по $PM_{2.5}$ из реанализа Службы мониторинга атмосферы в рамках программы «Коперник» (СМАК), показаны средние поверхностные концентрации $PM_{2.5}$ за 2003–2019 годы и аномалии (абсолютные разницы) в 2020 году по сравнению со средними значениями за 2003–2019 годы.

Сильные лесные пожары привели к аномально высоким концентрациям $PM_{2.5}$ в нескольких регионах мира, где в 2020 году было необычно сухо и жарко. В январе и предшествующем ему декабре юго-восток Австралии пострадал от широкомасштабных лесных пожаров, которые усугубили загрязнение воздуха (см. также *Бюллетень ВМО по аэрозолям 2021 года*). Дым от пожаров

в Австралии также привел к временному охлаждению в Южном полушарии, сравнимому с охлаждением, вызванным пеплом от извержения вулкана (Fasullo et al., 2021). Интенсивные лесные пожары также наблюдались в Якутском регионе Сибири, в американском штате Калифорния и во многих других областях запада США. Активность регулярно возникающих лесных пожаров в центральной части Южной Америки и центральной Африке также была выше средних показателей 2003–2019 годов. Концентрация $PM_{2.5}$ ниже среднего на западе Канады, в Индонезии и на севере Австралии объясняется менее интенсивными, чем обычно лесными пожарами в соответствующих регионах.

Изменчивость $PM_{2.5}$, связанная с пустынной пылью, очевидна над большими пустынными территориями и прилегающими территориями оттока. Хотя в восточной Сахаре показатели концентрации $PM_{2.5}$ у поверхности были ниже обычного, более частые явления переноса пыли, включая исключительно сильную пыльную бурю «Годзилла» в июне 2020 года, привели к повышению концентрации $PM_{2.5}$ над северной частью Атлантического океана (Chakraborty et al., 2021). Более слабые, чем обычно, выбросы пыли также наблюдались в пустынных регионах севера Китая и Монголии. Более подробную информацию можно найти в *Бюллетене ВМО по атмосферной пыли*.

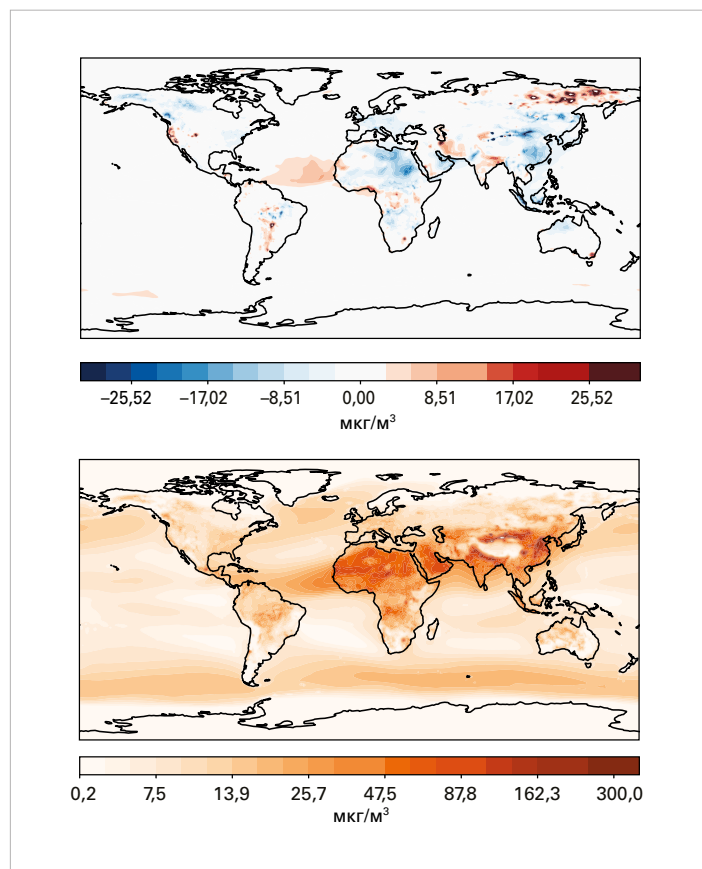


Рисунок 1. Аномалия (абсолютная разница) средних поверхностных концентраций $PM_{2.5}$ ($\mu\text{кг}/\text{м}^3$) в 2020 году по данным реанализа СМАК (вверху) в сравнении со средним значением за период 2003–2019 годов (внизу). В реанализе СМАК собраны данные об оптической плотности аэрозоля (ОПА), добытые с помощью спектро радиометра для получения изображений среднего разрешения (MODIS) и усовершенствованного радиометра с траекторным сканированием (AATSr), а также использованы данные о выбросах во время лесных пожаров Глобальной системы ассимиляции данных о пожарах (ГСАДП).

Источник: ЕЦСПП/СМАК

² Тропосфера – самая нижняя часть атмосферы. Она начинается у поверхности Земли и достигает высоты 6–15 км в зависимости от широты.

Аэрозоли, образующиеся в результате человеческой деятельности, оказывают наибольшее влияние на здоровье человека, поскольку они вносят основной вклад в образование $PM_{2.5}$ в густонаселенных районах. В 2020 году из-за экономического спада, спровоцированного пандемией COVID-19, произошло беспрецедентное сокращение некоторых видов человеческой деятельности, таких как передвижения на автомобилях и самолетах. В таких регионах, как Китай, Европа и Северная Америка краткосрочное сокращение выбросов, связанное с COVID, совпало с долгосрочными мерами по смягчению последствий выбросов, что привело к снижению концентрации $PM_{2.5}$ в 2020 году по сравнению с предыдущими годами. Увеличение концентрации $PM_{2.5}$ над Индией было менее выраженным, чем в предыдущие годы. Для улучшения моделирования состава атмосферы и его изменений критически важно лучше понимать, каковы многочисленные природные и антропогенные источники выбросов и каково их метеорологическое влияние на выбросы и на распространение возникающего загрязнения.

Методология СМАК

Объединение компьютерных моделей с данными наблюдений во времени, близком к реальному — процесс, известный как ассимиляция данных — стало основной причиной прогресса в области численного прогнозирования погоды в последние десятилетия (Bauer et al., 2015). Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды (ЕЦСПП) распространил этот подход на прогнозы качества воздуха, пылевых и пожарных шлейфов, стратосферного озона и парниковых газов по всему миру в рамках работы Службы мониторинга атмосферы в рамках программы «Коперник», которую Центр реализует от имени Европейского союза (Innes et al., 2019).

Поля, смоделированные компьютером и скорректированные с помощью результатов наблюдений, называются анализами. Анализы считаются более точными, чем результаты моделирования, поскольку систематическая корректировка на основе наблюдений со спутников, наземных станций, самолетов и шаров-зондов обеспечивает более полное покрытие, чем просто данные наблюдений («карта без белых пятен»). Анализы используются в качестве начальных условий для ежедневных прогнозов СМАК и в целях ретроспективного изучения состава атмосферы для понимания пространственного распределения, трендов и изменчивости малых газовых примесей и аэрозолей.

Взаимосвязь между климатом, пожарами и качеством воздуха в 2020 году

Чтобы лучше понимать, как антропогенные выбросы и выбросы газов из природных источников влияют на погоду и загрязнение воздуха, ученые из Бюро глобального моделирования и ассимиляции НАСА (<https://gmao.gsfc.nasa.gov>) объединяют широкий набор источников данных с численными моделями, отражающими физические и химические процессы в атмосфере. Такие модели, как Система наблюдения Земли Годдарда (CH3Г) (Gelaro et al., 2017; Randles et al., 2017; Buchard et al., 2017; Keller et al., 2021; Molod et al., 2015),



Рисунок 2. На снимке со спутника НУОА GOES-West, сделанном 12 сентября 2020 года, видно вовлечение необычно крупного и плотного шлейфа дыма от лесных пожаров на тихоокеанском северо-западе в среднеширотный циклон над восточным регионом северной части Тихого океана, а также второй шлейф, тянущийся от пустынного юго-запада в другой среднеширотный циклон над северной частью Среднего Запада. Это изображение было получено с помощью Интерактивной службы циклической обработки спутниковых данных в режиме реального времени штата Колорадо (SLIDER); <http://rammb-slider.cira.colostate.edu>, Micke, 2018).
Источник: CSU/СИРА и НУОА/НЕСДИС

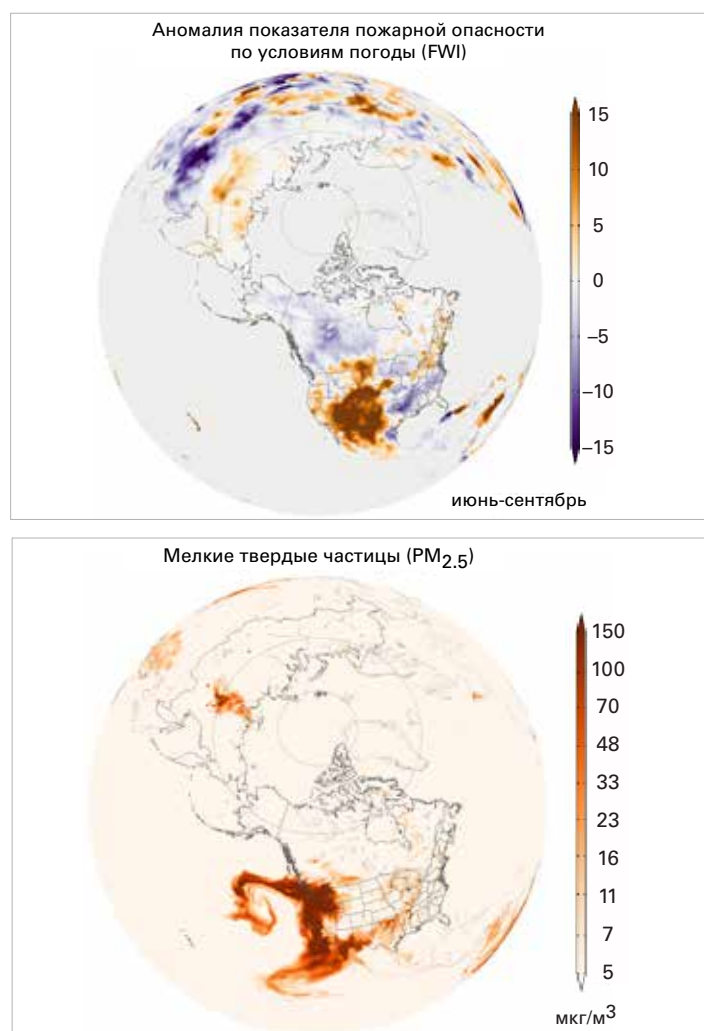


Рисунок 3. Вверху: карта сезонных аномалий показателя пожарной опасности по условиям погоды (2020 минус среднее значение 2003—2019 годов за июнь-сентябрь). Чем выше положительная аномалия, тем больше выражен увеличенный потенциал пожара; чем ниже отрицательная аномалия, тем больше выражен сниженный потенциал пожара; внизу: карта расчета концентрации мелких твердых частиц ($PM_{2.5}$) от пожаров 13 сентября 2020 года, соответствующих дымовым шлейфам, видимым на рисунке 2.
Источник: НАСА

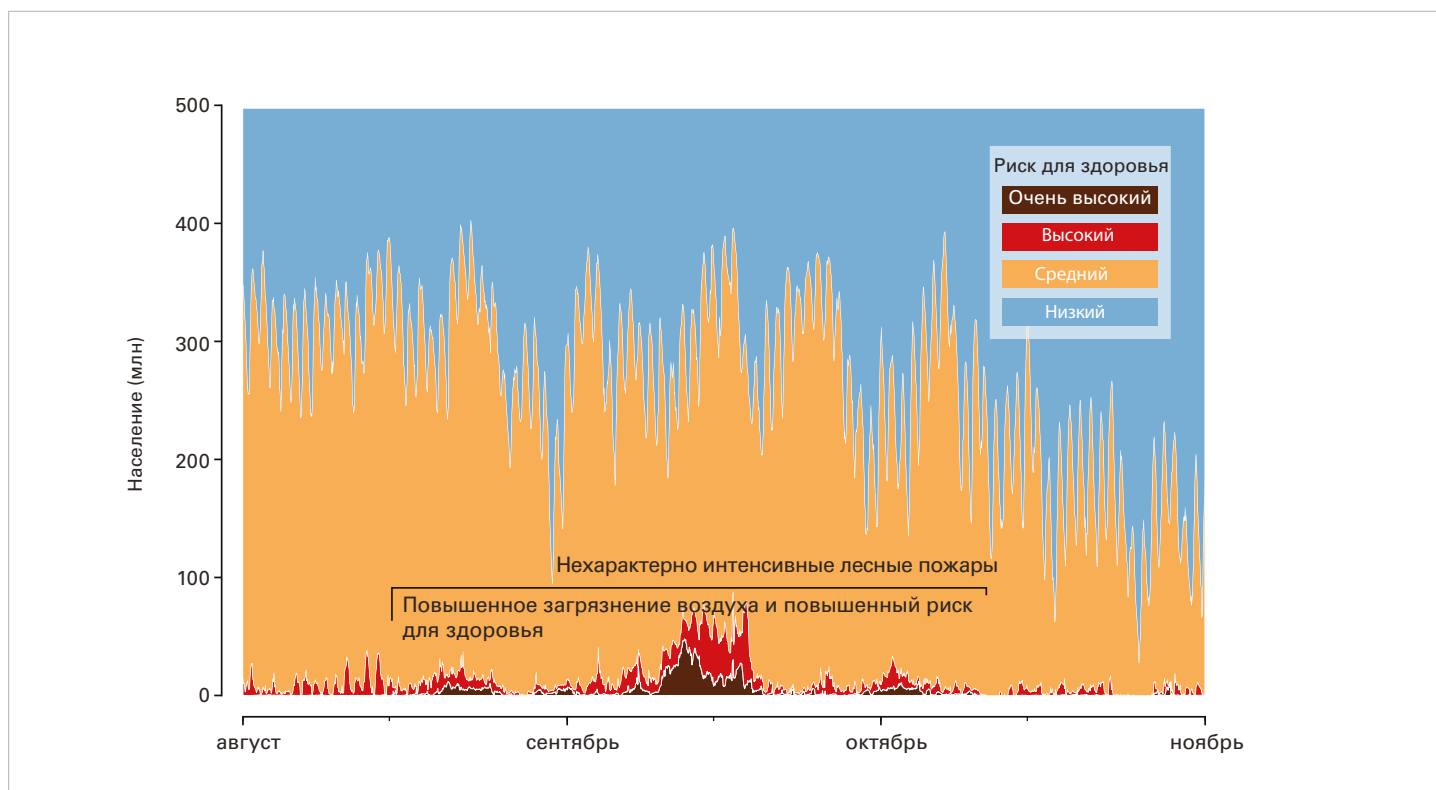


Рисунок 4. Значения показателя качества воздуха и здоровья для населения Северной Америки во время сезона лесных пожаров 2020 года, основанные на загрязнении воздуха, вызванном антропогенными и природными источниками.

Источник: Бюро глобального моделирования и ассимиляции, НАСА

являются мощными инструментами, которые могут быть использованы в дополнение там, где сетей наблюдений недостаточно, для осуществления полной цифровой регистрации явлений, таких как сезон интенсивных лесных пожаров в 2020 году.

Бюро глобального моделирования и ассимиляции использовало спутниковые данные о местонахождении и интенсивности пожаров для анализа лесных пожаров во внетропических регионах Евразии и Северной Америки в 2020 году. В 2020 году сезон лесных пожаров был отмечен экстремальными пожарами в Сибири и на западе США и нехарактерно низкой активностью пожаров на Аляске и в Канаде по сравнению с ситуацией в предыдущие десятилетия. Сравнение с оценками исторических выбросов от пожаров (2003—2019 годы) показало, что 2020 год был исключительным с точки зрения общего количества пирогенного углерода, выброшенного в атмосферу во время лесных пожаров в Сибири и на западе США, с чрезвычайно плотными и обширными шлейфами дыма, видимыми из космоса (рисунок 2). Показатель пожарной опасности по условиям погоды (FWI; Wagner, 1987), широко используемый показатель интенсивности и потенциала пожаров, дал дополнительное представление об аномальном сезоне пожаров; в нем количественно определено, насколько сильно на пожароопасность влияли основные метеорологические параметры, такие как температура, ветер, осадки и влажность. Анализ MERRA-2 на основе данных ЧЗГ (Gelaro et al., 2017) использовался для создания карты, где показан значительно более высокий FWI в Сибири и на западе США в соответствии с наблюдаемыми пожарами (рисунок 3). Сильная связь между отрицательными отклонениями от климатологии FWI и уменьшением потенциальной опасности пожаров также была очевидна в Канаде и на Аляске. Таким образом, поведение пожаров в крупных

пожароопасных районах во внетропических зонах Северного полушария может быть как минимум частично связано с устойчивыми погодными режимами умеренно-холодного лета 2020 года, например, с исторической волной тепла в высоких широтах Сибири.

Эти выводы вызывают беспокойство, поскольку они могут отражать все усиливающееся влияние изменений климата на вызванные погодными условиями механизмы, которые в больших масштабах изменяют поведение пожаров и выбросы загрязняющих веществ. В ряде публикаций отмечается, что экстремальные волны тепла и засухливые периоды, согласно прогнозам, будут усугубляться в результате изменений климата (IPCC, 2021); в одном исследовании делается заключение, что продолжительный период сильной жары в Сибири в 2020 году был бы практически невозможен без влияния человека (Ciavarella et al., 2021).

Для оценки влияния пожаров на загрязнение окружающего воздуха по всей Северной Америке Бюро глобального моделирования и ассимиляции рассчитало, сколько людей подверглось воздействию загрязняющих веществ различной концентрации (Stieb et al., 2008). Используя данные показателя качества воздуха и здоровья, учитывающего воздействие нескольких загрязнителей, Бюро заключило, что число людей, которые, вероятно, испытывали нездоровый уровень загрязнения воздуха, увеличилось во время сезона пожаров и достигло максимума во вторую неделю сентября, когда большинство интенсивных пожаров происходило на западе США. В течение более чем недели 20–50 миллионов человек — в основном на западе США, но также и в регионах, расположенных с подветренной стороны — классифицировались как люди с «высоким» или «очень высоким» риском для здоровья (рисунок 4).

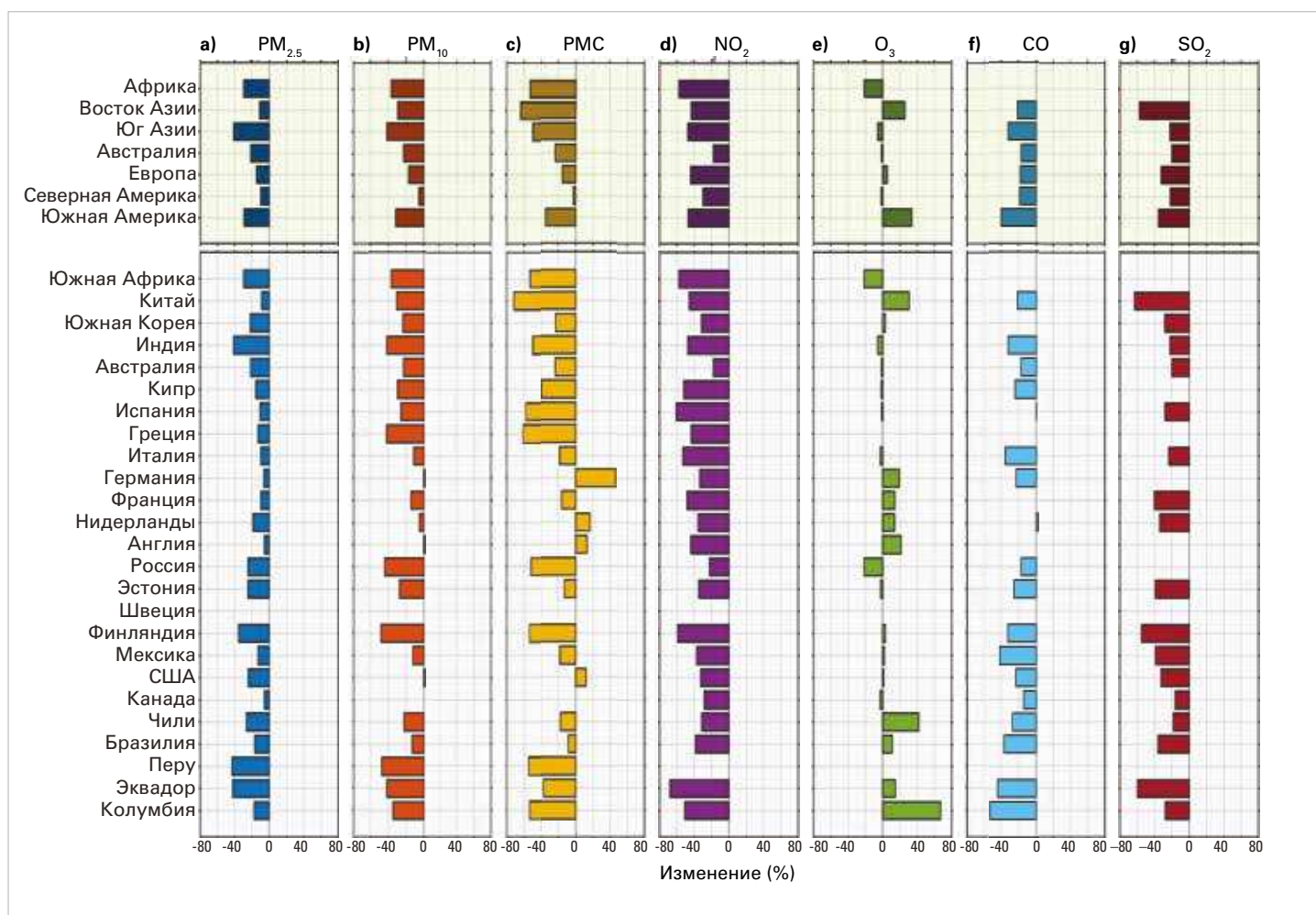


Рисунок 5. Средние по континенту/стране изменения загрязнения воздуха (в %) во время режима полной изоляции представлены в виде гистограмм: а) $PM_{2.5}$, б) PM_{10} , в) $PM_{10-2.5}$ (крупнодисперсная фракция PM), д) NO_2 , е) O_3 , ф) CO и г) SO_2 .

Источник: отредактированный вариант Sokhi et al., 2021.

Влияние пандемии COVID-19 на качество воздуха

Правительства многих стран мира отреагировали на пандемию COVID-19 ограничениями на проведение мероприятий, закрытием школ и введением режима изоляции. Стратегии, согласно которым людям следовало как можно больше оставаться дома, привели к беспрецедентному снижению выбросов загрязняющих веществ. В исследовании, координируемом ВМО/ГСА, изучалось поведение основных видов загрязнителей воздуха во время пандемии COVID-19 (Sokhi et al., 2021).

Используя последовательный подход, авторы исследования изучили данные наземных наблюдений за качеством воздуха *in situ*, полученные с более чем 540 транспортных, фоновых и сельских станций в 63 городах и их окрестностях в 25 странах, расположенных в семи географических регионах мира. Данные использовались для анализа изменений качества воздуха под воздействием основных загрязнителей, таких как твердые частицы ($PM_{2.5}$, PM_{10} , крупнодисперсная фракция PM), диоксид серы (SO_2), оксиды азота (NO_x), оксид углерода (CO) и озон (O_3), а также под воздействием общего газообразного окислителя³ ($OX = NO_2 + O_3$).

³ Окислитель — это химическое вещество, которое может окислять другие вещества, что означает, что оно может присоединять к себе электроны других веществ.

Были изучены изменения, происходившие на различных стадиях режима изоляции, а именно до режима изоляции, в режиме частичной изоляции, в режиме полной изоляции и в течение двух периодов ослабления ограничений, прошедших с января по сентябрь 2020 года. В ходе наблюдательного исследования анализировалось, как в 2020 году по сравнению с периодом 2015–2019 годов выбросы и региональная и местная метеорологическая обстановка влияли на изменения качества воздуха.

Во время различных этапов режима изоляции выбросы загрязняющих веществ в атмосферу резко сократились по всему миру из-за ограничений на поездки, введенных в целях остановить распространение COVID-19. В большинстве городов наблюдалась положительная корреляция между снижением концентрации NO_2 и NO_x и снижением мобильности населения. В отношении других загрязнителей явной корреляции не было зафиксировано, что позволяет предположить, что на изменение качества воздуха, помимо выбросов автотранспорта, также существенно влияют и другие источники.

Результаты анализа (рисунок 5) показали снижение средней концентрации NO_2 примерно на 70 % и средней концентрации $PM_{2.5}$ на 30–40 % во время режима полной изоляции в 2020 году по сравнению с теми же периодами в 2015–2019 годах. Поведение $PM_{2.5}$, однако, было неоднозначным даже в пределах одного региона: например, в некоторых городах

Испании наблюдалось повышение концентрации, что объяснялось преимущественно переносом на большие расстояния африканской пыли и/или горением биомассы. В некоторых городах Китая в периоды изоляции наблюдалось аналогичное увеличение концентрации $PM_{2.5}$, вероятно, из-за образования вторичных РМ. Изменения концентрации озона значительно различались в зависимости от региона: от общего отсутствия изменений до небольших повышений (как в Европе) и более значительных повышений (+25 % в Восточной Азии и +30 % в Южной Америке). В Республике Колумбия был зафиксирован наибольший рост — около 70 %. В определенных условиях загрязнения можно ожидать увеличения количества озона вместе с уменьшением его прекурсоров, что связано со сложностью химического состава озона. Анализ общего содержания окислителей показал, что первичные выбросы NO_2 в городских районах превышали производство O_3 , в то время как на участках фонового загрязнения ОХ в основном определялся региональным вкладом, а не местными концентрациями NO_2 и O_3 . Во всех регионах концентрации SO_2 были на ~25–60 % ниже в 2020 году, чем в 2015–2019 годах. Уровень СО снизился во всех регионах, причем наибольшее снижение — примерно до 40 % — наблюдалось в Южной Америке.

Этот незапланированный эксперимент с качеством воздуха может послужить эталоном, помогающим политикам понять, защищают ли существующие стандарты качества воздуха здоровье людей. Несмотря на то, что введение режима изоляции оказало явное воздействие на качество воздуха в городских районах, пространственные и временные масштабы этого воздействия, конкретная роль метеорологической обстановки и наличие эпизодического вклада (например, пыли, сжигания биомассы для бытовых и сельскохозяйственных нужд, удобрения зерновых культур), а также каскадные реакции от косвенного и нелинейного воздействия еще далеко не полностью изучены. Все еще необходимо более полное понимание

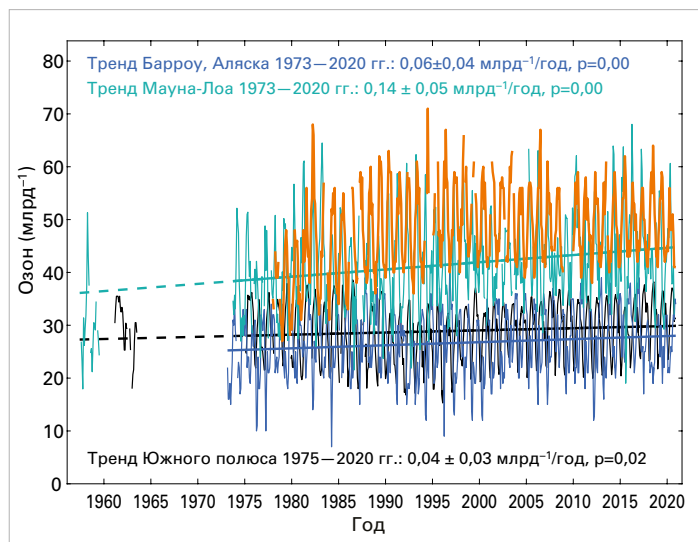


Рисунок 6. Месячные показатели озона на трех площадках глобального мониторинга фоновой концентрации озона ГСА: Базовая атмосферная обсерватория Барроу, Аляска (высота 11 м над уровнем моря); обсерватория Мауна-Лоа, Гавайи (высота 3397 м над уровнем моря); и обсерватория Южного полюса (высота 2837 м над уровнем моря). Приведены также месячные показатели концентрации озона в районе вершины Цугшпитце (высота 2800 м над уровнем моря) на южной границе Германии (оранжевый). млрд⁻¹ (частей на миллиард) = число молекул газа на миллиард (10⁹) молекул сухого воздуха
Источник: отредактированный вариант Cooper et al., 2020.

того, как изменилась химическая реакция вторичных загрязняющих веществ на изменение выбросов в сложных условиях и как социально-экономические факторы могут повлиять на качество воздуха в будущем. Последствия для региональной и глобальной политики также значительны: согласно исследованию Sokhi et al., 2021, несмотря на резкое сокращение передвижений населения, во многих регионах мира концентрация $PM_{2.5}$ вряд ли будет соответствовать рекомендациям Всемирной организации здравоохранения.

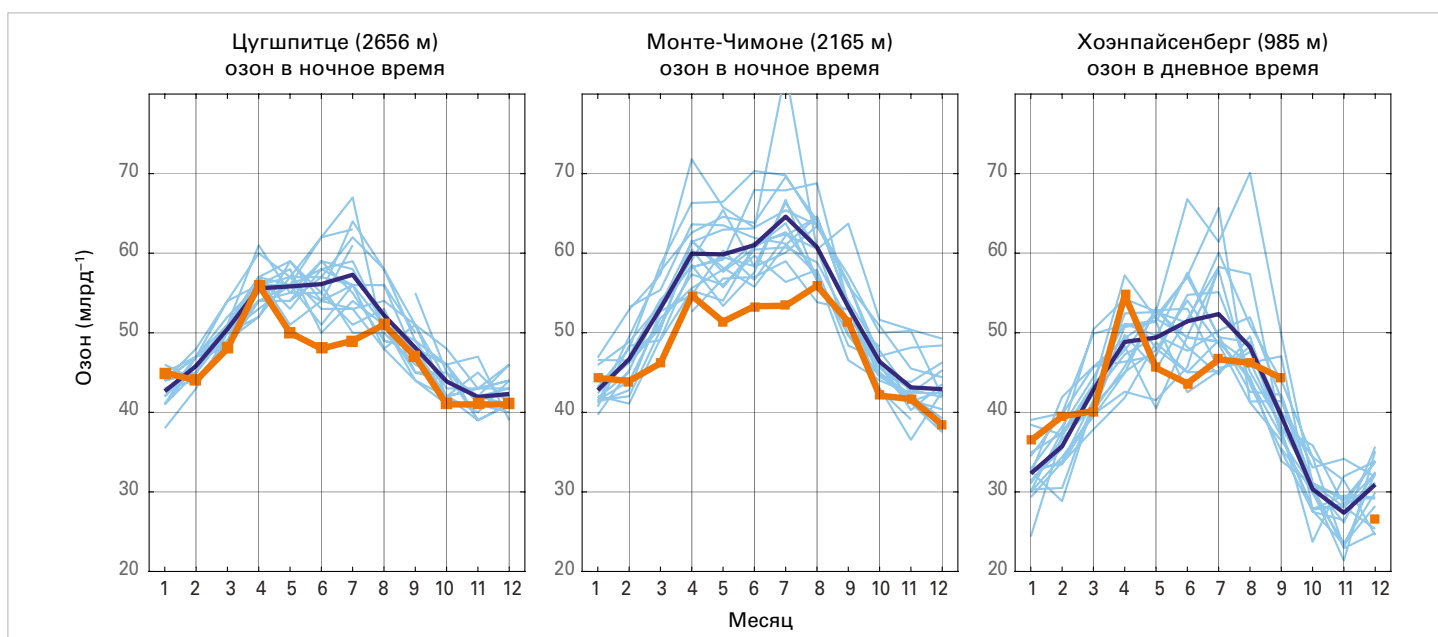


Рисунок 7. Слева: месячный средний показатель озона в ночное время на Цугшпитце, Германия, в 2020 году (оранжевый) в сравнении с отдельными годами с 2002 по 2019 год (голубой) и средним значением за 2002–2019 годы (синий). В центре: месячный средний показатель озона в ночное время в Монте-Чимоне, Италия. Справа: средний показатель озона в дневное время в Хознпайсенберге, Германия.

Источник: автор графиков Оуэн Купер

Низкие показатели содержания озона на станциях измерения фоновое содержание озона ГСА

На рисунке 6 показана долгосрочная изменчивость концентрации озона в трех весьма отдаленных местах. В северной части Северного полярного круга, в Базовой атмосферной обсерватории Барроу на северном побережье Аляски со времени начала наблюдений в 1973 году концентрация озона увеличилась на 11 %. Согласно наблюдениям обсерватории Мауна-Лоа, расположенной на высоте 3400 м над уровнем моря на острове Гавайи, с 1973 года концентрация озона в тропической зоне северной части Тихого океана увеличилась на 17 %. Исторические данные с Мауна-Лоа показывают, что с конца 1950-х годов концентрация озона увеличилась примерно на 50 %. В обсерватории на Южном полюсе, максимально удаленной от человеческой деятельности, концентрация озона с 1975 года увеличилась на 6 %. На всех трех участках наблюдается сильный сезонный цикл, но время годового максимума варьируется из-за различий в фотохимических процессах и погодных режимах, из-за которых озон переносится в эти удаленные места (Cooper et al., 2020).

На рисунке 6 также показаны долгосрочные изменения концентрации озона вблизи альпийской вершины Цугшпитце на юге Германии (высота 2800 м над уровнем моря). В зависимости от крайне изменчивых погодных режимов показатели концентрации озона могут отражать свойства воздуха, поступающего из загрязненного пограничного слоя⁴ Европы или воздуха за пределами Западной Европы. С момента начала записей (1978 год) до конца 1990-х годов концентрация озона увеличилась. С 2000 года концентрация озона изменилась относительно мало, хотя ее уровни немного снижались в теплые месяцы с мая по сентябрь, когда Цугшпитце чаще всего подвергается региональному европейскому загрязнению (Cooper et al., 2020).

На вершине Монте-Чимоне (Италия), самой высокой горы в северных Апеннинах, находится станция ВМО/ГСА. Недавнее исследование показало, что уровни озона в Монте-Чимоне были необычно низкими в период умеренно холодных весны и лета 2020 года, что, вероятно, связано с сокращением выбросов в Европе во время

⁴ Планетарный пограничный слой является самой низкой частью тропосферы и находится под сильным влиянием поверхностной турбулентности.

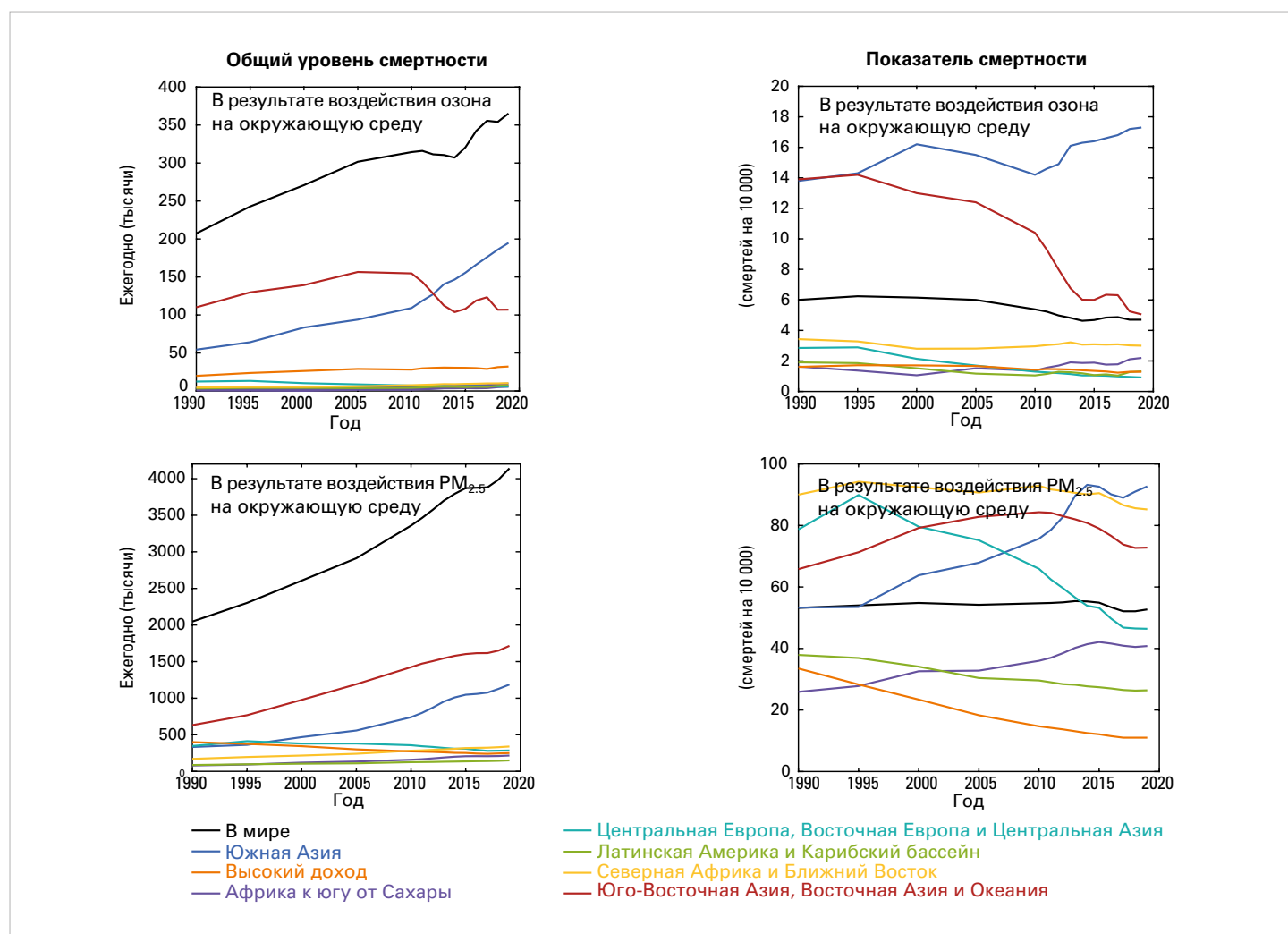


Рисунок 8. Оценка смертности «Глобальным бременем болезней» в 2019 году. Обратите внимание, что общий уровень смертности по оси у для PM_{2.5} в 10 раз больше, чем по оси у для озона, а значения показателя смертности по оси у для PM_{2.5} в 5 раз больше, чем по оси у для озона. Данные отображаются для семи суперрегионов, созданных ГББ и основанных на двух критериях: эпидемиологическое сходство и географическая близость. Регион «Высокий доход» включает США, Канаду, Чили, Аргентину, Уругвай, Западную Европу, Израиль, Австралию, Новую Зеландию, Японию и Республику Корея. Карта суперрегионов доступна на сайте <http://www.healthdata.org/gbd/faq>.

Источник: Murray et al., 2020.

экономического спада периода COVID-19 (Cristofanelli et al., 2021). Аналогичные сокращения зафиксированы в Цугшпитце, в 350 км к северу (рисунок 7). Низкие значения концентрации озона в мае, июне и июле также наблюдались на вершине холма в Хознпайсенберге, Германия, но снижение относительно среднего многолетнего уровня было не таким сильным, как в Цугшпитце, в 40 км к югу. Весеннее и летнее снижение содержания озона в Монте-Чимоне и Цугшпитце весьма необычно; эти показатели ниже, чем все другие данные, зарегистрированные за последние два десятилетия. Эти сокращения даже больше, чем те, которые были зафиксированы в свободной тропосфере в средних широтах Северного полушария с помощью шаров-зондов, лидара (лазерного прибора) и коммерческих летательных аппаратов в 2020 году (Steinbrecht et al., 2021; Clark et al., 2021), что указывает на то, что экономический спад в период пандемии COVID-19 значительно повлиял на образование озона по всей Европе.

Глобальные оценки смертности от загрязнения окружающего воздуха и воздуха в помещениях

Инициатива «Глобальное бремя болезней» (ГББ) предоставляет регулярные обновления (двухлетний цикл) данных о преждевременной смертности и инвалидности от 369 заболеваний и травм в 204 странах и территориях (Murray et al., 2020) с 1990 года по настоящее время, включая экологические угрозы здоровью, такие как плохое качество воздуха из-за загрязнения озоном окружающей среды (на открытом воздухе), твердых частиц в окружающей среде (в частности $PM_{2.5}$) и твердых частиц в жилищах (внутри помещений) (<http://www.healthdata.org/gbd/about>).

ГББ количественно оценивает глобальное воздействие озонового загрязнения окружающего воздуха, объединяя данные наблюдений с тысяч станций мониторинга качества приземного воздуха по всему миру и результаты моделирования химии атмосферы (Schultz et al., 2017; Chang et al., 2019; DeLang et al., 2021). Аналогичным образом воздействие $PM_{2.5}$ рассчитывается на основе наблюдений на тысячах станций мониторинга по всему миру, глобальных спутниковых наблюдений за столбами твердых частиц и выходных данных модели химии атмосферы (van Donkelaar et al., 2017). Были составлены глобальные карты воздействия озона и $PM_{2.5}$ на окружающий воздух на период 1990—2019 годов, что позволило ученым ГББ оценить ежегодную смертность в результате долгосрочного воздействия (Murray et al., 2020).

На рисунке 8 показаны оценки смертности от загрязнения окружающего воздуха согласно последней оценке ГББ (Murray et al., 2020). Среди причин глобальной смертности от загрязнения окружающего воздуха преобладают твердые частицы, от воздействия которых в 2019 году умерло 4,1 миллиона человек, в то время как от воздействия на окружающий воздух озона умерло 365 000 человек. Эти оценки не являются точными, и неопределенность (95 % интервал неопределенности) для этих значений составляет ± 20 % для твердых частиц и ± 50 % для озона в окружающем воздухе (Health Effects Institute, 2020). В целом смертность в мире увеличилась с 2,3 миллиона человек в 1990 году (91 % — из-за твердых частиц,

9 % — из-за озона) до 4,5 миллиона человек в 2019 году (92 % — из-за твердых частиц, 8 % — из-за озона). На региональном уровне общая смертность в настоящее время наиболее высока в суперрегионе Юго-Восточной Азии, Восточной Азии и Океании (1,8 миллионов смертных случаев; 94 % — из-за твердых частиц, 6 % — из-за озона), за которым следует суперрегион Южной Азии (1,4 миллионов смертных случаев; 86 % — из-за твердых частиц, 14 % — из-за озона). Глобальный показатель смертности (число смертей в расчете на 100 000 человек) от загрязнения окружающей среды озоном с 2010 года снизился на 13 %, а глобальный показатель смертности от загрязнения окружающей среды твердыми частицами снизился на 4 %.

Другой основной причиной преждевременной смертности являются твердые частицы в жилых помещениях, которые образуются в результате сжигания твердого и жидкого топлива для приготовления пищи и отопления дома. ГББ оценивает смертность в результате сжигания твердого топлива для приготовления пищи и предполагает, что в 2019 году было 2,3 миллиона преждевременных смертей (неопределенность ± 30 %) (Health Effects Institute, 2020). Таким образом, оценка ГББ общего уровня смертности от загрязнения воздуха в атмосфере и в жилых помещениях в 2019 году составляет 6,8 миллионов человек, из которых 34 % смертей произошло из-за твердых частиц, образовавшихся в результате приготовления пищи. Подавляющее большинство смертей, связанных с твердыми частицами в помещениях, случается в суперрегионах Южной Азии, Африки к югу от Сахары и Юго-Восточной Азии, Восточной Азии и Океании. Хотя общий уровень смертности от твердых частиц в помещениях в этих регионах неуклонно снижается с 2010 года, показатели смертности остаются высокими, особенно в странах Африки к югу от Сахары, где показатель смертности от твердых частиц в помещениях примерно в три раза превышает показатель смертности от твердых частиц в окружающей среде. Углубленный анализ глобальной смертности от загрязнения атмосферного воздуха и воздуха в жилищах можно найти в докладе State of Global Air 2020 (Глобальное состояние воздуха в 2020 году) (Health Effects Institute, 2020).

Заключения

В заключение этот выпуск *Бюллетеня ВМО по качеству воздуха и климату* подчеркивает важнейшую роль, которую играют наблюдения в мониторинге состояния атмосферы. Долгосрочные, последовательные измерения позволяют сообществу понять, как изменились условия по сравнению с прошлым, и улучшать модели качества воздуха и климата для более качественного моделирования атмосферы. Еще имеются возможности для улучшения — модельные прогнозы всегда будут иметь некоторую неопределенность — но во времена быстрых изменений в деятельности человека (как в 2020 году) заполнение пробелов в наблюдениях за основными химическими соединениями значительно улучшит нашу способность моделировать изменения атмосферы по мере их возникновения. Глобальная служба атмосферы ВМО (WMO/GAW, 2014; Schultz et al., 2015) поддерживает измерения состава атмосферы, анализ и исследования, включая исследования связи между качеством воздуха и климатом. Многие загрязняющие

вещества (химически активные газы и аэрозоли) являются частью обширных программ измерений, проводимых на станциях ГСА по всему миру. Благодаря этим данным доступен уникальный архив изменений химического состава атмосферы Земли. Станции ГСА предоставляют ценные данные для оценки глобальных трендов озона и аэрозолей (Tarasick et al., 2019, Collaud Coen et al., 2020), проведения исследований изменения климата (Hartmann et al., 2013, Laj et al., 2020), оценки глобальных и региональных моделей климата-химии (Mortier et al., 2020, Gliš et al., 2021) и количественной оценки глобального воздействия озона на здоровье человека (Chang et al., 2019; DeLang et al., 2021).

Список источников

- Bauer, P.; Thorpe, A.; Brunet, G. The Quiet Revolution of Numerical Weather Prediction. *Nature* **2015**, 525 (7567), 47–55. <https://doi.org/10.1038/nature14956>.
- Buchard, V.; Randles, C. A.; Silva, A. M. da et al. The MERRA-2 Aerosol Reanalysis, 1980 Onward. Part II: Evaluation and Case Studies. *Journal of Climate* **2017**, 30 (17), 6851–6872. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0613.1>.
- Chakraborty, S.; Guan, B.; Waliser, D. E. et al. Extending the Atmospheric River Concept to Aerosols: Climate and Air Quality Impacts. *Geophysical Research Letters* **2021**, 48 (9), e2020GL091827. <https://doi.org/10.1029/2020GL091827>.
- Chang, K.-L.; Cooper, O. R.; West, J. J. et al. A New Method (M3Fusion v1) for Combining Observations and Multiple Model Output for an Improved Estimate of the Global Surface Ozone Distribution. *Geoscientific Model Development* **2019**, 12 (3), 955–978. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-955-2019>.
- Ciavarella, A.; Cotterill, D.; Stott, P. et al. Prolonged Siberian Heat of 2020 Almost Impossible without Human Influence. *Climatic Change* **2021**, 166 (1), 9. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03052-w>.
- Clark, H.; Bennouna, Y.; Tsvilidou, M. et al. The Effects of the COVID-19 Lockdowns on the Composition of the Troposphere as Seen by IAGOS. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions* **2021**, 1–33. <https://doi.org/10.5194/acp-2021-479>.
- Collaud Coen, M.; Andrews, E.; Alastuey, A. et al. Multidecadal Trend Analysis of in Situ Aerosol Radiative Properties around the World. *Atmospheric Chemistry and Physics* **2020**, 20 (14), 8867–8908. <https://doi.org/10.5194/acp-20-8867-2020>.
- Cooper, O. R.; Schultz, M. G.; Schröder, S. et al. Multi-Decadal Surface Ozone Trends at Globally Distributed Remote Locations. *Elementa: Science of the Anthropocene* **2020**, 8 (23). <https://doi.org/10.1525/elementa.420>.
- Cristofanelli, P.; Arduni, J.; Serva, F. et al. Negative Ozone Anomalies at a High Mountain Site in Northern Italy during 2020: A Possible Role of COVID-19 Lockdowns? *Environ. Res. Lett.* **2021**, 16 (7), 074029. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac0b6a>.
- DeLang, M. N.; Becker, J. S.; Chang, K.-L. et al. Mapping Yearly Fine Resolution Global Surface Ozone through the Bayesian Maximum Entropy Data Fusion of Observations and Model Output for 1990–2017. *Environ. Sci. Technol.* **2021**, 55 (8), 4389–4398. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c07742>.
- Fasullo, J. T.; Rosenbloom, N.; Buchholz, R. R. et al. Coupled Climate Responses to Recent Australian Wildfire and COVID-19 Emissions Anomalies Estimated in CESM2. *Geophysical Research Letters* **2021**, 48 (15), e2021GL093841. <https://doi.org/10.1029/2021GL093841>.
- Fiore, A. M.; Naik, V.; Spracklen, D. V. et al. Global Air Quality and Climate. *Chem. Soc. Rev.* **2012**, 41 (19), 6663–6683. <https://doi.org/10.1039/C2CS35095E>.
- Gelaro, R.; McCarty, W.; Suárez, M. J. et al. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2). *Journal of Climate* **2017**, 30 (14), 5419–5454. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1>.
- 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). <https://doi.org/10.1525/elementa.2021.00176>.
- Gliš, J.; Mortier, A.; Schulz, M. et al. AeroCom Phase III Multi-Model Evaluation of the Aerosol Life Cycle and Optical Properties Using Ground- and Space-Based Remote Sensing as Well as Surface in Situ Observations. *Atmospheric Chemistry and Physics* **2021**, 21 (1), 87–128. <https://doi.org/10.5194/acp-21-87-2021>.
- Hartmann, D.L.; Klein Tank, A.M.G.; Rusticucci, M. et al. Chapter 2. Observations: Atmosphere and Surface. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Stocker, T.F. et al., (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, 2013. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2017/09/WG1AR5_Chapter02_FINAL.pdf.
- Health Effects Institute. *State of Global Air 2020*. Special Report. 2020. Boston, MA: Health Effects Institute. https://www.stateofglobalair.org/sites/default/files/documents/2020-10/soga-2020-report-10-26_0.pdf.
- Inness, A.; Ades, M.; Agustí-Panareda, A.; Barré, J. et al. The CAMS Reanalysis of Atmospheric Composition. *Atmospheric Chemistry and Physics* **2019**, 19 (6), 3515–3556. <https://doi.org/10.5194/acp-19-3515-2019>.
- IPCC. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 2021. (Masson-Delmotte, V. et al., Eds.). <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/>.
- Kaiser, J. W.; Heil, A.; Andreae, M. O. et al. Biomass Burning Emissions Estimated with a Global Fire Assimilation System Based on Observed Fire Radiative Power. *Biogeosciences* **2012**, 9 (1), 527–554. <https://doi.org/10.5194/bg-9-527-2012>.
- Keller, C. A.; Knowland, K. E.; Duncan, B. N. et al. Description of the NASA GEOS Composition Forecast Modeling System GEOS-CF v1.0. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* **2021**, 13 (4), e2020MS002413. <https://doi.org/10.1029/2020MS002413>.
- Laj, P.; Bigi, A.; Rose, C. et al. A Global Analysis of Climate-Relevant Aerosol Properties Retrieved from the Network of Global Atmosphere Watch (GAW) near-Surface Observatories. *Atmospheric Measurement Techniques* **2020**, 13 (8), 4353–4392. <https://doi.org/10.5194/amt-13-4353-2020>.

- Micke, K. Every Pixel of GOES-17 Imagery at Your Fingertips. *Bulletin of the American Meteorological Society* **2018**, 99 (11), 2217–2219. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0272.1>.
- Molod, A.; Takacs, L.; Suarez, M. et al. Development of the GEOS-5 Atmospheric General Circulation Model: Evolution from MERRA to MERRA2. *Geoscientific Model Development* **2015**, 8 (5), 1339–1356. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1339-2015>.
- Mortier, A.; Gliß, J.; Schulz, M. et al. Evaluation of Climate Model Aerosol Trends with Ground-Based Observations over the Last 2 Decades – an AeroCom and CMIP6 Analysis. *Atmospheric Chemistry and Physics* **2020**, 20 (21), 13355–13378. <https://doi.org/10.5194/acp-20-13355-2020>.
- Murray, C. J. L.; Aravkin, A. Y.; Zheng, P. et al. Global Burden of 87 Risk Factors in 204 Countries and Territories, 1990–2019: A Systematic Analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *The Lancet* **2020**, 396 (10258), 1223–1249. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30752-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30752-2).
- Pye, H. O. T.; Liao, H.; Wu, S. et al. Effect of Changes in Climate and Emissions on Future Sulfate-Nitrate-Ammonium Aerosol Levels in the United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **2009**, 114 (D1). <https://doi.org/10.1029/2008JD010701>.
- Randles, C. A.; Silva, A. M. da; Buchard, V. et al. The MERRA-2 Aerosol Reanalysis, 1980 Onward. Part I: System Description and Data Assimilation Evaluation. *Journal of Climate* **2017**, 30 (17), 6823–6850. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0609.1>.
- Schultz, M. G.; Akimoto, H.; Bottenheim, J. et al. The Global Atmosphere Watch Reactive Gases Measurement Network. *Elementa: Science of the Anthropocene* **2015**, 3 (000067). <https://doi.org/10.12952/journal.elementa.000067>.
- Schultz, M. G.; Schröder, S.; Lyapina, O. et al. Tropospheric Ozone Assessment Report: Database and Metrics Data of Global Surface Ozone Observations. *Elementa: Science of the Anthropocene* **2017**, 5 (58). <https://doi.org/10.1525/elementa.244>.
- Sokhi, R. S.; Singh, V.; Querol, X. et al. A Global Observational Analysis to Understand Changes in Air Quality during Exceptionally Low Anthropogenic Emission Conditions. *Environment International* **2021**, 157, 106818. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106818>.
- Steinbrecht, W.; Kubistin, D.; Plass-Dülmer, C. et al. COVID-19 Crisis Reduces Free Tropospheric Ozone Across the Northern Hemisphere. *Geophysical Research Letters* **2021**, 48 (5), e2020GL091987. <https://doi.org/10.1029/2020GL091987>.
- Stieb, D. M.; Burnett, R. T.; Smith-Doiron, M. et al. A New Multipollutant, No-Threshold Air Quality Health Index Based on Short-Term Associations Observed in Daily Time-Series Analyses. *Journal of the Air & Waste Management Association* **2008**, 58 (3), 435–450. <https://doi.org/10.3155/1047-3289.58.3.435>.
- Tarasick, D.; Galbally, I. E.; Cooper, O. R. et al. Tropospheric Ozone Assessment Report: Tropospheric Ozone from 1877 to 2016, Observed Levels, Trends and Uncertainties. *Elementa: Science of the Anthropocene* **2019**, 7 (39). <https://doi.org/10.1525/elementa.376>.
- van Donkelaar, A.; Martin, R. V.; Brauer, M. et al. Global Estimates of Fine Particulate Matter Using a Combined Geophysical-Statistical Method with Information from Satellites, Models, and Monitors. *Environ. Sci. Technol.* **2016**, 50 (7), 3762–3772. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b05833>.
- Wagner, C. E. V. *Development and Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System*; Forestry technical report; Canada Communication Group Publ: Ottawa, 1987.
- West, J. J.; Smith, S. J.; Silva, R. A. et al. Co-Benefits of Mitigating Global Greenhouse Gas Emissions for Future Air Quality and Human Health. *Nature Clim Change* **2013**, 3 (10), 885–889. <https://doi.org/10.1038/nclimate2009>.
- World Meteorological Organization (WMO), WMO Aerosol Bulletin. No. 4, 2021. https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=21886#.YS421tMzZGw.
- World Meteorological Organization (WMO), WMO Airborne Dust Bulletin. No. 5, 2021. https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=19826#.YS42btMzZGw.
- WMO/GAW. *The Global Atmosphere Watch Programme: 25 Years of Global Coordinated Atmospheric Composition Observations and Analyses*. WMO Report. WMO-No. 1143. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=7886.

Выражение признательности и ссылки

Данные по аэрозолям и химически активным газам, собранные в рамках программы ГСА при поддержке Членов ВМО и содействующих сетей, доступны в Мировом центре данных по аэрозолям и химически активным газам, который поддерживается Норвежским институтом исследования воздуха, Норвегия. Данные по оксиду углерода поступают из Мирового центра данных по парниковым газам, поддержку которому оказывает Японское метеорологическое агентство. Станции ГСА описаны в Системе информации о станциях ГСА (<https://gawsis.meteoswiss.ch/>), которая получает поддержку со стороны Метеорологической службы Швейцарии.

Все данные Службы мониторинга атмосферы в рамках программы «Коперник» находятся в свободном доступе в хранилище данных об атмосфере: <https://ads.atmosphere.copernicus.eu>.

Данный Бюллетень содержит материалы ВМО/ГСА: Научной консультативной группы по аэрозолям, Научной консультативной группы по применениям, Научной консультативной группы ГСА по проекту метеорологических исследований городской среды, Научной консультативной группы ГСА по химически активным газам и Руководящего комитета Глобальной информационно-прогностической системы по качеству воздуха.

Оценки смертности от загрязнения окружающего воздуха и воздуха в жилых помещениях, полученные в рамках ГББ, можно загрузить с сайта <https://www.stateofglobalair.org/>.

Редакционный совет

Оуэн Р. Купер (CIRES Университет Колорадо Боулдер/НУОА CSL, Соединенные Штаты Америки), Ранжит С. Сохи (Университет Хартфордшира, Соединенное Королевство Великобритании и Северной Ирландии),

Джули М. Найсли (Университет Мэриленда и НАСА, США), Грег Кармайл (Университет Айовы, США), Антон Дарменов (НАСА, США), Паоло Ладж (Университет Гренобль Альпы, Франция и Университет Хельсинки, Финляндия) и Джон Лиджио (Министерство охраны окружающей среды Канады).

Все авторы в алфавитном порядке:

Мария де Фатима Андраде (Университет Сан-Паулу, Бразилия), Ребекка М. Гарланд (Совет по научным и промышленным исследованиям, Северо-Западный университет и Университет Претории, Южная Африка), Антон Дарменов (НАСА, США), Грег Кармайл (Университет Айовы, США), Ксавье Кероль (Институт оценки качества окружающей среды и водных исследований, Испанский исследовательский совет, Испания), Паоло Кристофанелли (Институт атмосферных наук и климата (CNR-ISAC), Италия), Дагмар Кубистин (Deutscher Wetterdienst, Германия), Шаофэй Кун (Китайский университет наук о Земле, Китай), Оуэн Р. Купер (CIRES Университет Колорадо Боулдер/НУОА CSL, США), Седрик Куре (Германское агентство по вопросам охраны окружающей среды (UBA), Германия), Паоло Ладж (Университет Гренобль Альпы, Франция и Университет Хельсинки, Финляндия), Джон Лиджио (Министерство охраны окружающей среды Канады, Канада), Жорди Массажэ (Институт оценки качества окружающей среды и водных исследований, Испанский исследовательский совет и Политехнический университет Каталонии, Испания), Джули М. Найсли (Университет Мэриленда и НАСА, США), Раденко Павлович (Министерство охраны окружающей среды Канады, Канада), Ирина Петропавловских (CIRES Университет Колорадо Боулдер/НУОА ЛХН, США), Венсан-Анри Пёч (ЕЦСПП), Самуэль Реми (HYGEOS), Викас Сингх (Национальная лаборатория атмосферных исследований, Индия), Ранджит С. Сохи (Университет Хартфордшира, Соединенное королевство), Адмир Креско Таргино (Федеральный технологический университет, Бразилия), Сандро Финарди (ARIANET, Италия), Йоханнес Флемминг (ЕЦСПП).

Контакты

Всемирная метеорологическая организация

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

Мировой центр данных по химически активным газам и Мировой центр данных по аэрозолям

Норвежский институт по исследованиям атмосферы (NILU), Кьеллер, Норвегия
Электронная почта: kt@nilu.no
Веб-сайт: <https://www.gaw-wdcrg.org/>
<https://www.gaw-wdca.org/>

Мировой центр данных по парниковым газам

Японское метеорологическое агентство, Токио
Электронная почта: wdcgg@met.kishou.go.jp
Веб-сайт: <https://gaw.kishou.go.jp/>