



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. Напротив, загрязнение воздуха, которое появляется вблизи поверхности Земли, происходит в сроки от нескольких дней до нескольких недель, а его пространственные масштабы варьируются от местных (например, городские центры) до региональных (как в восточной части Соединенных Штатов Америки, на севере Индии или в Амазонии). Несмотря на эти существенные различия, качество воздуха и изменения климата тесно взаимосвязаны. В *Бюллетене ВМО по качеству воздуха и климату* ежегодно публикуется информация о состоянии качества воздуха и его связи с изменением климата, учитывающая географическое распределение традиционных загрязняющих веществ и изменения уровней загрязнения.

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 поскольку изменения в одном неизбежно влекут за собой изменения и в другом. Деятельность человека, приводящая к выбросу долгоживущих парниковых газов в атмосферу, также приводит к усилению концентрации короткоживущего озона и твердых частиц в атмосфере. Например, при сжигании ископаемого топлива (основной источник диоксида углерода (CO_2)) в атмосферу также выбрасывается оксид азота (NO), который может приводить к фотохимическому образованию озона и нитратных

аэрозолей¹. Аналогичным образом в результате некоторых видов сельскохозяйственной деятельности (которые являются основным источником парникового газа метана) происходят выбросы аммиака, который затем образует аммиачные аэрозольные соединения. Качество воздуха, в свою очередь, влияет на здоровье экосистемы через атмосферное осаждение (процесс, в ходе которого загрязнители воздуха оседают из атмосферы на поверхность Земли), что, таким образом, также связывает качество воздуха с климатом. Осаждение азота, серы и озона может негативно влиять на услуги, предоставляемые природными экосистемами, такие как чистая вода, биоразнообразие и хранение углерода, а также может влиять на урожайность в сельскохозяйственных системах.

Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) ООН недавно выпустила Шестой оценочный доклад (ОД6), в котором изложены причины наблюдаемого изменения климата, воздействие изменения климата на общество и систему Земля, а также ряд решений по смягчению последствий изменения климата (<https://www.ipcc.ch/reports/>). Доклад содержит сценарии того, как может меняться качество воздуха по мере потепления климата в XXI веке. Эти сценарии варьируются от возможности увеличения выбросов загрязнителей воздуха в развивающихся регионах мира до углеродно-нейтрального сценария, при котором безотлагательная и эффективная политика ограничения выбросов парниковых газов (таких как CO_2 и метан) обеспечивает сопутствующую выгоду в виде быстрого сокращения выбросов загрязняющих воздух веществ (таких как NO , черный углерод или диоксид серы (SO_2)).

Настоящее издание *Бюллетеня ВМО по качеству воздуха и климату* содержит последнюю информацию о глобальном распределении твердых частиц за 2021 год, при этом особое внимание уделено вкладу в него экстремальных лесных пожаров. В связи с увеличением частоты и интенсивности лесных пожаров, а также прогнозируемым ростом активности лесных пожаров в некоторых частях мира по мере потепления климата (UNEP, 2022) в данном издании

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

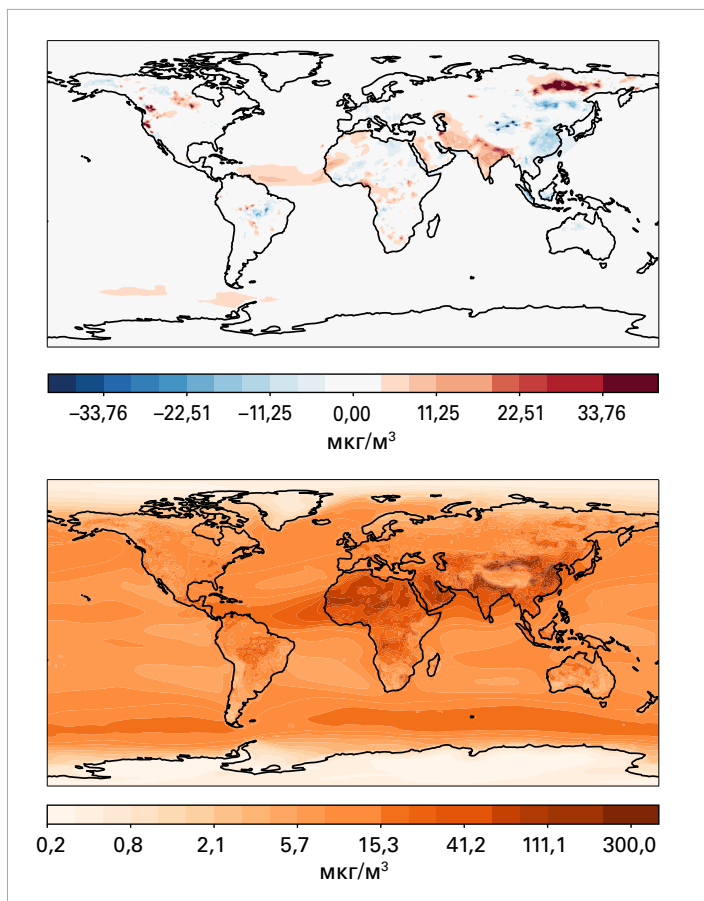


Рисунок 1. Аномалия (абсолютная разница) средних поверхностных концентраций $PM_{2,5}$ ($\mu\text{кг}/\text{м}^3$) в 2021 году по данным реанализа СМАК (вверху) в сравнении со средним значением за период 2003—2020 годов (внизу). Низкие концентрации в океанах в основном обусловлены частицами морской соли естественного происхождения. В реанализе СМАК собраны спутниковые 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 данные о выбросах во время лесных пожаров Глобальной системы ассимиляции данных о пожарах (ГСАДП).

Источник: ЕЦСПП/СМАК

бюллетеня рассматривается воздействие дыма (от лесных пожаров и сжигания сельскохозяйственных культур) на качество воздуха. В Бюллетене также рассматривается ряд возможных последствий для качества воздуха по мере дальнейшего потепления климата в XXI веке при сценариях с высоким и низким уровнем выбросов, и в заключение приводится обзор последствий атмосферного осаднения для качества воздуха, здоровья экосистемы и климата.

Глобальный уровень концентрации твердых частиц в 2021 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 (WHO, 2021). На глобальном уровне деятельность человека и природные источники вносят вклад в загрязнение частицами $PM_{2,5}$ в различных

пропорциях. Источниками являются выбросы от сжигания ископаемого топлива, лесные пожары и разносимая ветром пустынная пыль.

Интенсивные лесные пожары привели к аномально высоким концентрациям $PM_{2,5}$ в Сибири и Канаде в июле и августе 2021 года. Концентрация $PM_{2,5}$ в Восточной Сибири достигла уровня, ранее не наблюдавшегося, несмотря на постоянное увеличение числа лесных пожаров в предыдущие годы, что было обусловлено в основном повышением температур и сухостью почвы (Romanov et al., 2022). Данные по $PM_{2,5}$ из реанализа Службы мониторинга атмосферы в рамках программы «Коперник» (СМАК) (который объединяет результаты наблюдений и выходную продукцию моделей для заполнения пробелов) говорят о крупных аномалиях (абсолютных разницах) в годовых поверхностных концентрациях $PM_{2,5}$ в 2021 году (рисунок 1, вверху) по сравнению со средними значениями за период 2003—2020 годов (рисунок 1, внизу), при этом подчеркивается, что крупные источники выбросов связаны с районами лесных пожаров в Сибири, Канаде и западной части США.

Аномалии $PM_{2,5}$, вызванные лесными пожарами, являются результатом воздействия ряда таких дополнительных факторов, помимо метеорологии, как деятельность человека, борьба с пожарами, источник возгорания (молния или по вине человека) и распространение. Положительная аномалия $PM_{2,5}$ над территорией Индии и отрицательная

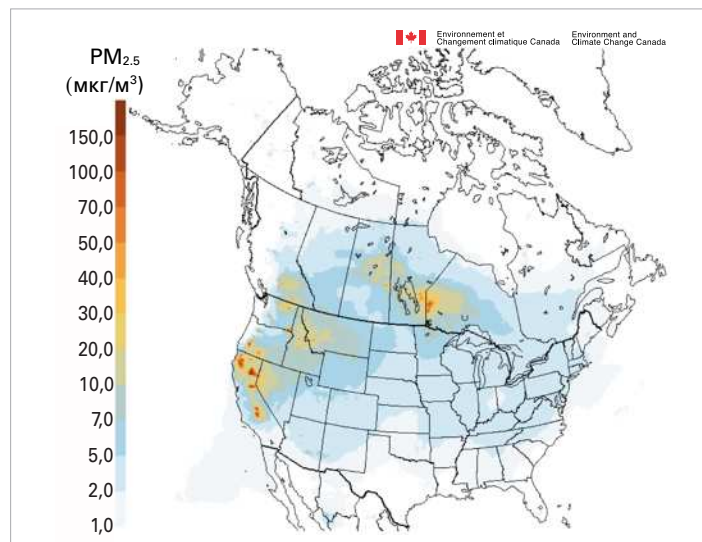


Рисунок 2. Сезонный (среднее значение за период с мая по сентябрь) вклад $PM_{2,5}$ от пожаров в общий прогнозируемый уровень поверхностных концентраций $PM_{2,5}$ ($\mu\text{кг}/\text{м}^3$) над территорией Северной Америки в 2021 году. Эти средние показатели были рассчитаны с помощью оперативных систем обеспечения качества воздуха Министерства охраны окружающей среды Канады: FireWork и Региональной системы детерминированного прогнозирования качества воздуха (RAQDPS) (Moran et al., 2014; Pavlovic et al., 2016). Система FireWork идентична системе RAQDPS, за исключением того, что она содержит также информацию о выбросах от лесных пожаров, получаемую со спутника в режиме, близком к реальному времени. Чтобы оценить прямой вклад $PM_{2,5}$ от пожаров в общую концентрацию $PM_{2,5}$, поле концентрации $PM_{2,5}$ согласно RAQDPS (по данным на тот же час) было вычтено из поля согласно FireWork.

аномалия над Китаем в 2021 году были в основном проявлением роста или сокращения антропогенных (вызванных деятельностью человека) выбросов в этих двух регионах соответственно. В отличие от положительных аномалий $PM_{2,5}$, вызванных лесными пожарами в летнее время, аномалии преимущественно антропогенного $PM_{2,5}$ возникали в основном зимой, когда загрязняющие вещества задерживались у поверхности благодаря холодным и стабильным условиям и слабому ветру. Антропогенные выбросы от отопления и сжигания местных сельскохозяйственных отходов также достигали пиковых значений в Индии и Южной Азии в зимние месяцы.

Растущая опасность загрязнения воздуха в результате лесных пожаров

Лесные пожары, которые включают крупномасштабное сжигание биомассы, в том числе пожары в лесу, кустарниковые пожары и пожары в саванне, являются неотъемлемым и неизбежным явлением природного ландшафта. Хотя лесные пожары, которые возникают в естественных условиях или борьба с которыми ведется традиционными методами, приносят ряд экосистемных выгод (Pausas and Keeley, 2019), все более интенсивные пожары могут быть разрушительными для окружающей среды, дикой природы, здоровья человека и экономики (UNEP, 2022). Поскольку дым от лесных пожаров представляет собой сложную динамическую смесь газов и мельчайших частиц, он может раздражать дыхательную систему человека. Воздействие этого загрязнения, особенно $PM_{2,5}$, вызывает серьезную озабоченность. В глобальном масштабе наблюдения за ежегодной общей площадью выжженных земель показывают тренд на снижение за последние два десятилетия за счет уменьшения количества пожаров в саваннах и на лугопастбищных угодьях (Бюллетень ВМО по аэрозолям, № 4). Однако в континентальном масштабе в некоторых регионах

наблюдаются тренды на увеличение, включая, в числе прочего, западную часть Северной Америки, Амазонию и Австралию (UNEP, 2022).

Как уже упоминалось выше, в 2021 году сезон пожаров в западной части Северной Америки отличался большой интенсивностью — ежегодные суммарные расчетные выбросы вошли в пятерку самых высоких за период с 2003 по 2021 год — и вызвал масштабное загрязнение воздуха. На рисунке 2 показано, что средний вклад выбросов от лесных пожаров в общую концентрацию $PM_{2,5}$ в окружающей среде за период с мая по сентябрь превышает 10 мкг/м^3 , а в некоторых районах — 20 мкг/м^3 . Для сравнения: предельный годовой уровень загрязнения $PM_{2,5}$, рекомендуемый Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ), составляет 5 мкг/м^3 . Пространственное распределение рисков для здоровья, связанных с этим источником выбросов, было оценено с помощью системы прогнозирования состава атмосферы HACA GEOS (GEOS-CF; Keller et al., 2021) с индексом качества воздуха и здоровья, учитывающим воздействие нескольких загрязнителей, рассчитанным на детей с респираторными рисками (Gladson et al., 2022), над территорией Северной Америки. Этот анализ подтвердил, что экстремальные концентрации $PM_{2,5}$ в основном обусловлены выбросами от лесных пожаров и в первую очередь отвечают за самые серьезные риски развития неблагоприятных последствий для здоровья в западной и северной частях Северной Америки.

Заглядывая в будущее, все большее влияние на качество воздуха в регионе могут оказывать лесные пожары, особенно в свете последствий изменения климата в региональном масштабе. Измеримое воздействие изменения климата в региональном масштабе, влияющее на частоту и интенсивность лесных пожаров, уже наблюдается в разных частях мира (UNEP, 2022), что препятствует достижению целей

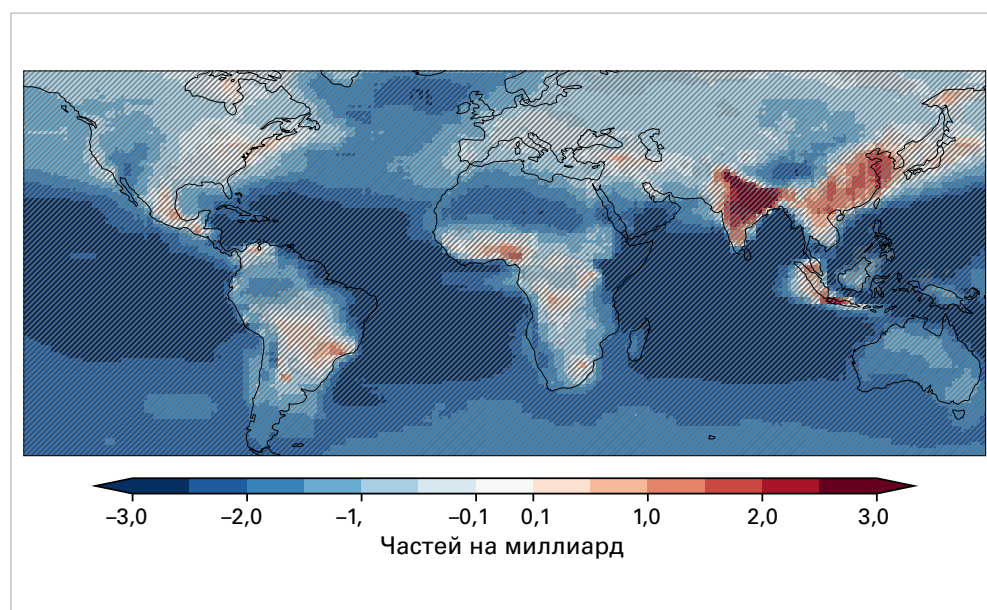


Рисунок 3. Прогнозируемые изменения в уровнях приземного озона, вызванные только изменением климата в конце XXI века (2055–2081 годы), если глобальная средняя температура поверхности Земли поднимется на $3,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ относительно средней температуры конца XIX века (1850–1900 годы). Этот прогноз предполагает увеличение выбросов загрязняющих веществ в атмосфере развивающихся регионов и основан на построении пяти глобальных химико-климатических моделей. Штриховкой обозначены регионы, где с прогнозируемыми изменениями согласуются менее четырех из пяти моделей, поэтому большее доверие вызывают регионы без штриховки. Более подробную информацию см. в Zanis et al. (2022).

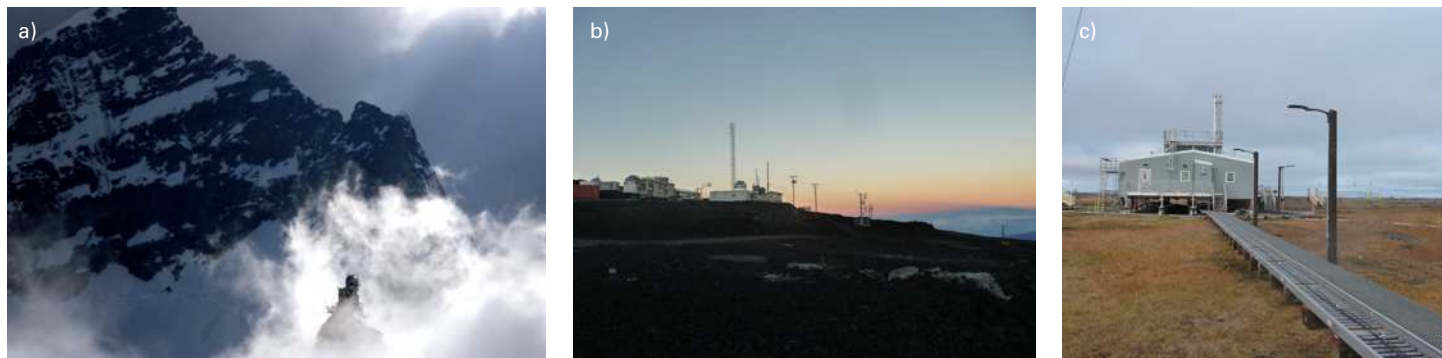


Рисунок 4. К площадкам программы Глобальной службы атмосферы ВМО (ГСА), на которых с 1970-х годов проводятся измерения составляющих частей атмосферы, относятся: а) станция Обсерватории «Сфинкс», Юнгфраухох, Швейцария (фото: Paul Scherrer Institute); б) Обсерватория Мауна-Лоа, Гавайи (фото: Betsy Andrews)) и в) Базовая атмосферная обсерватория Барроу вблизи Уткиагвика, Аляска (фото: Betsy Andrews).

ВОЗ в области качества воздуха. Согласно недавнему отчету ЮНЕП (UNEP, 2022), к 2100 году ожидается рост числа лесных пожаров на 50 %, и этот сценарий пока не учитывается в рамках существующих стратегий контроля качества воздуха.

Подробная глобальная количественная оценка характеристик лесных пожаров и соответствующих механизмов контроля имеет решающее значение для разработки надежных стратегий управления качеством воздуха, особенно в пожароопасных регионах. Примеры, приведенные в данном разделе, иллюстрируют важность оценки стандартов качества воздуха через региональную призму, учета региональных факторов и возможностей смягчения последствий и их интеграции в глобальное видение в интересах улучшения качества воздуха.

Состояние качества воздуха в будущем при сценарии с высоким уровнем выбросов

Озон является загрязнителем воздуха на поверхности Земли, негативно влияющим на здоровье, урожайность и состояние экосистем. Изменения в озоне могут происходить в результате изменений выбросов таких прекурсоров, как оксиды азота (NO_x , то есть оксид азота плюс двуокись азота) и летучие органические соединения (ЛОС), связанных со сжиганием ископаемого топлива или лесными пожарами, или как следствие изменения в синоптических ситуациях: колебания климата. Волны тепла связаны с плохим качеством воздуха, поскольку стабильные атмосферные условия и низкая скорость ветра способствуют накоплению загрязняющих веществ у поверхности, а жаркие сухие условия связаны с интенсивным солнечным светом, который усугубляет процесс фотохимического производства озона. По данным МГЭИК в XXI веке практически наверняка будет наблюдаться увеличение частоты, интенсивности и продолжительности волн тепла, что может способствовать росту числа эпизодов плохого качества воздуха над сильно загрязненными территориями и с подветренной им стороны.

В рамках последней оценки МГЭИК (IPCC, 2021) было проведено моделирование с использованием

химико-климатических моделей последнего поколения для количественной оценки будущих изменений в уровнях озона. Однако стоит отметить, что даже последнее поколение химико-климатических моделей не обеспечивает необходимого разрешения для полного отражения горячих точек выбросов и реалистичных режимов NO_x и ЛОС для образования озона. Поэтому результаты такого моделирования следует интерпретировать с осторожностью. Тем не менее, в рамках этого моделирования при сценарии, в котором выбросы загрязняющих веществ в атмосферу в развивающихся регионах мира увеличиваются, прогнозируется также увеличение уровня приземного озона. Увеличение содержания озона в основном связано с увеличением выбросов прекурсоров; однако повышение температуры и изменение условий перемешивания (как факторы

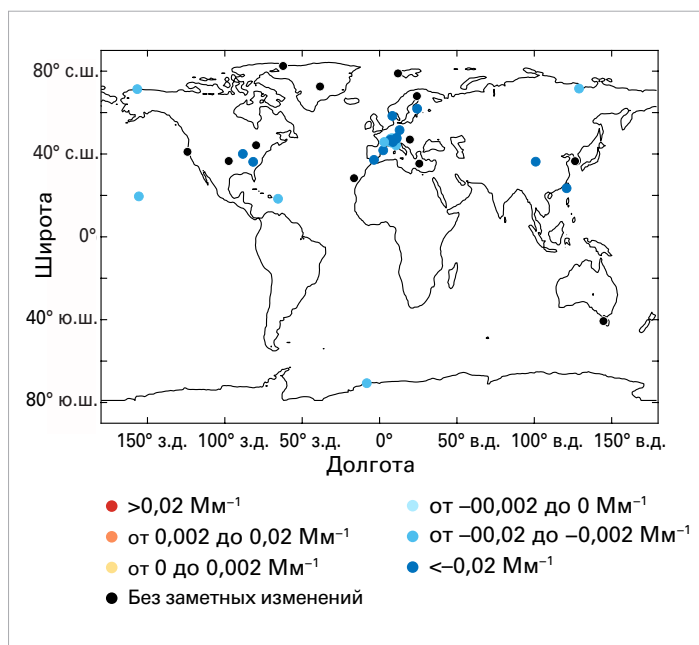


Рисунок 5. Долгосрочные тренды поглощения света черным углеродом и минеральной пылью на основе измерений, проводившихся на станциях приземных наблюдений по всему миру с 2009 по 2018 год. Единица измерения — обратные мегаметры (Mm^{-1}), стандартная мера поглощения света в атмосфере частицами или газами. Синие и оранжевые символы соответствуют отрицательным и положительным трендам соответственно.

Источник: адаптировано из работы Collaud Coen et al. (2020)

изменения климата) также могут оказывать свое влияние. Если учитывать только влияние последнего, то прогнозируется снижение уровня концентрации озона в океанах и на многих участках суши мира. Это происходит потому, что более теплый воздух обычно содержит больше водяного пара, который уменьшает концентрацию озона в результате химических реакций. Однако, согласно прогнозам, снижение на суше будет небольшим, и, если выбросы парниковых газов останутся высокими, вследствие чего глобальная температура повысится на 3 °C по сравнению с доиндустриальными уровнями ко второй половине XXI века, ожидается, что уровни приземного озона повысятся в сильно загрязненных районах, особенно в Азии (рисунок 3). Например, согласно этому сценарию, в будущем озон может вырасти на 20 % в регионе, охватывающем Пакистан, северную часть Индии и Бангладеш, и на 10 % в восточной части Китая. Большая часть увеличения содержания озона будет связана с увеличением выбросов от сжигания ископаемого топлива; однако примерно пятая часть этого увеличения будет связана с изменением климата, которое, скорее всего, будет проявляться за счет увеличения волн тепла, которые усугубляют случаи загрязнения воздуха. Это воздействие изменения климата на загрязнение озоном называют «климатическим наказанием». Хотя регионы с наиболее суровым прогнозируемым климатическим наказанием занимают относительно небольшую часть поверхности Земли, в них проживает примерно четверть населения Земли, и поэтому изменение климата может усугубить случаи загрязнения озоном, что приведет к пагубному воздействию на здоровье сотен миллионов людей.

В отличие от сценария с высоким уровнем выбросов, при котором большая часть прогнозируемого увеличения приземного озона будет вызвана ростом выбросов прекурсоров озона, а не прямым воздействием изменения климата, сценарий углеродно-нейтральных уровней выбросов во всем мире мог бы ограничить в будущем возникновение случаев экстремального загрязнения воздуха озоном. Это связано с тем, что усилия по смягчению воздействий изменения климата за счет отказа от сжигания ископаемого топлива (на основе углерода) также приведут к сокращению большинства антропогенных выбросов газов-прекурсоров озона (в частности, оксида азота (NO_x), ЛОС и метана). Однако с точки зрения смягчения последствий загрязнения воздуха, вызванного лесными пожарами, снижение выбросов ископаемого топлива будет иметь ограниченную эффективность, поскольку лесные пожары будут продолжаться. Даже при сценарии с низким уровнем выбросов атмосфера Земли будет продолжать немного нагреваться, поскольку климат еще не полностью отреагировал на парниковые газы, уже накопившиеся в атмосфере. По оценкам МГЭИК, вероятность случаев катастрофических природных пожаров, подобных тем, которые наблюдались в центральной части Чили

в 2017 году, в Австралии в 2019 году или на западе США в 2020 и 2021 годах, к концу этого столетия, по-видимому, возрастет на 40—60 % при сценарии с высоким уровнем выбросов и на 30—50 % при сценарии с низким уровнем выбросов.

Взаимосвязь между климатом и качеством воздуха в низкоуглеродном будущем

Аэрозольные частицы (такие как пыль и черный углерод) возникают в атмосфере как из природных источников, так и в результате деятельности человека. Количество частиц меняется в пространстве и времени из-за большого числа источников и относительно короткого времени пребывания в атмосфере. Высокое содержание аэрозольных частиц является признаком плохого качества воздуха. Они не только оказывают негативное воздействие на здоровье человека, но и могут вызывать охлаждение атмосферы, отражая солнечный свет обратно в космос или поглощая солнечный свет в атмосфере, в результате чего он так и не достигает земной поверхности. Одним из способов оценки глобального уровня аэрозолей являются спутниковые наблюдения. Другой способ заключается в подробных измерениях аэрозоля, проводимых на таких площадках для приземных наблюдений, как станции программы Глобальной службы атмосферы (ГСА) ВМО по всему миру (рисунок 4). Оба типа наблюдений обеспечивают долгосрочные (>10 лет) наборы данных, из которых можно вывести тренды аэрозолей. Данные измерений свидетельствуют о том, что количество аэрозоля в атмосфере продолжает уменьшаться (см. рисунок 5), что согласуется с уменьшением ослабления света частицами (то есть коллективного воздействия аэрозольных частиц, уменьшающих количество солнечного света, достигающего земной поверхности, путем поглощения или отражения солнечного света), которое началось в 1980-х годах в Центральной Европе и Северной Америке и в 2000-х годах в Северной Азии, Южной Америке и на большей части Африки (IPCC, 2021). Данное уменьшение указывает на эффективность политики в отношении качества воздуха в плане снижения содержания в атмосфере аэрозольных частиц и их прекурсоров; однако такое уменьшение также увеличивает количество солнечного света (и, следовательно, тепла), достигающего поверхности Земли. Регионы, которые раньше других приняли политику в отношении контроля качества воздуха, в настоящее время демонстрируют меньший потенциал охлаждения атмосферы из-за изменений в концентрации и составе аэрозолей.

Глобальные климатические модели в целом способны воспроизводить наблюдаемые региональные тренды в отношении количества аэрозолей; однако масштабы и неопределенности трендов, полученные в рамках различных моделей и в результате

наблюдений, неодинаковы. В свете этого модели могут использоваться в дополнение к спутниковым измерениям для оценки трендов аэрозолей в местах, где отсутствуют наблюдения, но с меньшей достоверностью. Отсутствие долгосрочных наблюдений в некоторых регионах (например, в большей части южного полушария) ограничивает нашу способность оценить некоторые ключевые компоненты качества воздуха и воздействия на климат² (такие как концентрации черного углерода), которые трудно обнаружить с помощью спутников и других приборов дистанционного зондирования.

Как упоминалось в предыдущем разделе, в Шестом оценочном докладе (IPCC, 2021) используются модели для оценки ряда сценариев смягчения воздействий на изменение климата, чтобы понять их потенциальное воздействие как на качество воздуха, так и на климат. Одним из таких сценариев смягчения воздействий является низкоуглеродный вариант (ОСЭВ1 1.9), который предусматривает сокращение выбросов двуокиси углерода до чистого нулевого

уровня примерно к 2050 году. Сокращение выбросов двуокиси углерода также повлияет на концентрации в атмосфере аэрозольных частиц и их прекурсоров, поскольку они выбрасываются вместе с такими парниковыми газами, как двуокись углерода. Шестой оценочный доклад (IPCC, 2021) предполагает, что низкоуглеродный вариант будет связан с небольшим краткосрочным потеплением, предшествующим снижению температуры. Это связано с тем, что последствия снижения концентрации аэрозольных частиц, то есть уменьшения количества солнечной радиации, отражаемой в космос, будут ощущаться в первую очередь, в то время как снижение температуры в ответ на сокращения выбросов двуокиси углерода займет больше времени. Однако естественные выбросы аэрозолей (например, пыль, дым от лесных пожаров), вероятно, увеличатся в более теплой и засушливой среде из-за условий опустынивания и засухи и могут свести на нет некоторый эффект от сокращения аэрозолей, образующихся в результате деятельности человека. Какое воздействие окажут такие изменения на качество воздуха и климат на региональном и глобальном уровнях, остается довольно неопределенным.

² Воздействие на климат — это физический процесс влияния на климат Земли с помощью ряда факторов внешнего воздействия, например, путем повышения уровней концентрации парниковых газов в атмосфере.

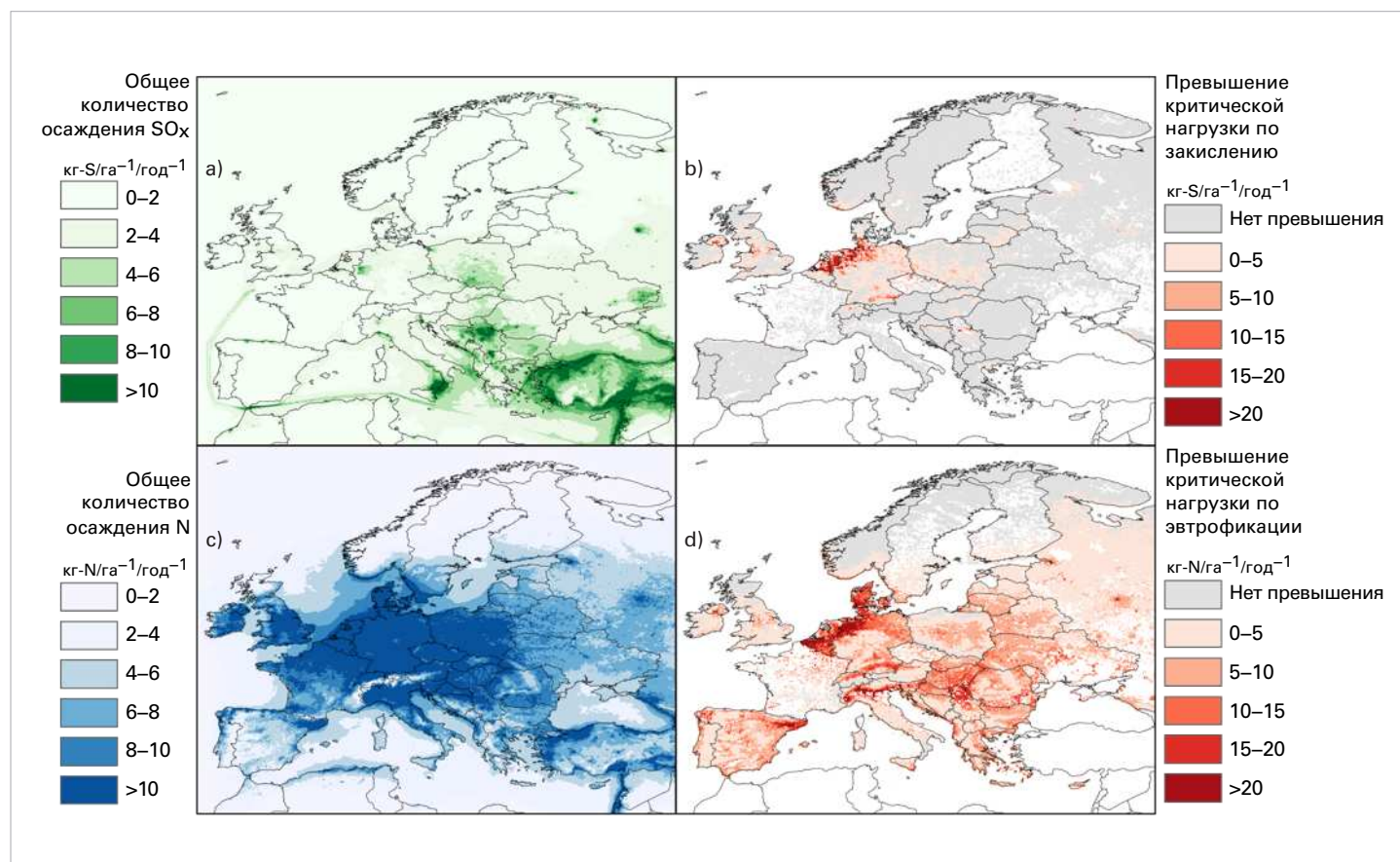


Рисунок 6. Атмосферное осаждение общей окисленной серы (SO_x) и общего реактивного азота (N) (измеряется в кг на гектар в год) (ЕМЕР, 2021) и соответствующие превышения критической нагрузки (то есть количество осаждения, превышающего критическую нагрузку) по закислению и эвтрофикации суши в Европе в 2019 году. На данной карте общий реактивный азот включает как окисленные, так и восстановленные формы азота. Методы количественной оценки приведенных критических нагрузок и пространственное разрешение данных о критических нагрузках различаются в зависимости от страны (Hetteling et al., 2017).



Рисунок 7. Примеры пробоотборников для влажного осаджения (а), Дюк Форест, Чапел-Хилл, Северная Каролина, США; фото: John Walker), влажного и сухого осаджения (проникающие осадки) под пологом леса (б), Дюк-Форест, Чапел-Хилл, Северная Каролина, США; фото: John Walker) и сухого осаджения общего реактивного азота (с), Национальный парк Баварский лес, Германия, Wintjen et al., 2022; фото (через): Christian Brümmer). Методы мониторинга осаджений различаются по сложности и стоимости — от относительно простых воронкообразных приемников для измерения проникающих осадков до передовых систем, сочетающих измерения атмосферной турбулентности и химии с более высоким временным разрешением, которые необходимы для непосредственного определения уровня сухого осаджения (с).

Между воздействием атмосферных аэрозолей на здоровье и климат существует компромиссное соотношение (высокие концентрации вредны для здоровья, но хороши для охлаждения). В Шестом оценочном докладе (IPCC, 2021) отмечается, что «некоторые варианты улучшения качества воздуха вызывают дополнительное потепление климата, а некоторые меры, направленные на борьбу с изменением климата, могут ухудшить качество воздуха». Низкоуглеродный вариант, похоже, поможет решить обе проблемы — быстро снизить концентрацию аэрозолей, воздействию которых подвергаются люди, и одновременно ускорить процесс устранения основных агентов, вызывающих эффект потепления.

Атмосферное осаджение связывает качество воздуха, здоровье экосистемы и климат

Осаждение и последствия для экосистемы

Газы и частицы попадают из атмосферы в экосистемы путем сухого осаджения (когда газы или содержащиеся в воздухе частицы покидают атмосферу, вступая в контакт с поверхностью Земли) или путем выпадения с осадками, также известного как влажное осаджение (когда газы или частицы удаляются из атмосферы дождевыми каплями или снежными хлопьями). Хотя осаджение многих загрязняющих веществ (таких как озон) имеет большое значение, акцент будет сделан на других загрязняющих веществах, которые также могут нанести вред. Например, соединения азота (N) и серы (S) по отдельности и в комбинации являются источниками кислотности в экосистемах, а в случае с азотом также оказывают воздействия, связанные с наличием избыточных питательных веществ, то есть

эвтрофикацию³. Закисление почвы и воды может увеличить смертность растений и водных организмов и повысить уязвимость к другим факторам стресса для экосистемы (таким как изменение климата). Кроме того, осаджение азота может нанести вред лишайникам, уменьшить разнообразие почвенных микроорганизмов и изменить состав растительного сообщества. Эти воздействия отражаются на качестве услуг, предоставляемых здоровыми экосистемами, включая биоразнообразие, чистую питьевую воду, продукты питания и лесную продукцию, а также хранение углерода. Критическая нагрузка (КН), представляющая собой величину осаджений, при превышении которой можно ожидать вредных последствий, связывает подверженность экосистемы с загрязнением (то есть качеством) воздуха посредством осаджения. КН была разработана для ряда компонентов экосистемы, а воздействие закисления и эвтрофикации используется для оценки риска от текущего загрязнения и при принятии политических и управленческих решений.

Тренды в области качества воздуха и осаджения

В Европе⁴ выбросы серы и азота от сжигания ископаемого топлива (а именно таких окисленных форм, как SO_x и NO_x) снизились за последние два десятилетия (2000—2019 годы) примерно на 75 % (SO_x) и 40 % (NO_x) при соответствующем снижении

³ Эвтрофикация — это обогащение экосистемы лимитирующим питательным веществом. Она может наблюдаться как в наземных (расположенные на суше), так и в водных экосистемах. Например, чрезмерное количество азота в водных экосистемах может привести к цветению воды, образованию мертвых зон и гибели рыбы.

⁴ Сюда входят 27 членов Европейского союза, члены Европейской ассоциации свободной торговли, Соединенное Королевство Великобритании и Северной Ирландии, Монако и Западные Балканы.

концентраций в воздухе и осаджения. Выбросы аммиака (NH_3), одной из форм восстановленного азота, источником которого является в основном сельское хозяйство, за тот же период сократились лишь примерно на 10 % (ЕМЕР, 2021). В США сокращение выбросов (примерно на 90 % для NO_x и SO_x с 2000 года: U.S. EPA, 2022) также привело к снижению осаджения азота и серы. В Китае выбросы SO_x и NO_x также сократились (примерно на 62 % и 17 % соответственно) с 2010 года (2010—2017 годы) (Zheng et al., 2018), наряду с осаджением окисленных азота и серы (Zhao et al., 2021), в то время как выбросы и осаджение восстановленного азота (главным образом, газообразного аммиака (NH_3), аэрозольного аммония (NH_4^+) и аммония во влажном осаджении) остались на относительно высоком уровне. Ввиду наличия механизмов регулирования в области сжигания ископаемого топлива, но не в сельском хозяйстве, осаджение азота в Европе и США изменилось в сторону преобладания восстановленного, а не окисленного азота, в то время как в Китае наблюдается более равномерное распределение.

Статус осаджения и превышение критической нагрузки в различных регионах

КН по эвтрофикации превышены в большинстве европейских стран (рисунок 6(d)). Напротив, КН кислотности превышены на гораздо меньшей площади (рисунок 6(b)) за счет резкого снижения уровня осаджения серы (рисунок 6(a)). В США снижение уровня осаджения серы свело к относительно небольшим районам на востоке страны, хотя многие системы поверхностных вод все еще находятся под угрозой ввиду исторически высокого осаджения. Как и в Европе, в США более широко распространено превышение КН по эвтрофикации, при этом особенно чувствительны сообщества лишайников, горные поверхностные воды и некоторые виды растений (Geiser et al., 2019; Lynch et al., 2020). Несмотря на сокращение выбросов, темпы осаджения серы и азота в Китае выше по сравнению с Европой и США, причем наибольшие превышения КН по осаджению азота и серы наблюдаются в юго-западных и центральных регионах Китая (Zhao et al., 2021).

Дальнейшие перспективы

Осаджения серы и азота и их результирующее воздействие на экосистемы сильно различаются по всему миру. Исходя из текущих оценок КН, превышение нормальных уровней осаджения, особенно в отношении азота, имеет широкое распространение. Карты с указанием уровней осаджения и превышения КН, подобные приведенным на рисунке 6, представляют собой важные инструменты управления качеством воздуха и здоровьем экосистем. Однако для снижения неопределенности в уровнях превышения КН и

для более точной оценки риска причинения вреда экосистеме срочно требуются более передовые методы, объединяющие количественные измерения с атмосферными моделями для создания карт суммарного осаджения, имеющих глобальный охват (Fu et al., 2022). Для совершенствования этих методов и соответствующих моделей необходимо проводить дополнительные измерения влажного и сухого осаджения (рисунок 7), особенно в тех географических регионах, где возможности мониторинга остаются ограниченными (Африка, Индия, Южная Америка). В будущем шаги по обеспечению более эффективного управления качеством воздуха для защиты здоровья экосистемы будут играть важную роль в разработке устойчивых природоохранных климатических решений⁵.

Заключения

Во втором выпуске Бюллетеня ВМО по качеству воздуха и климату описывается растущее воздействие дыма от лесных пожаров на качество воздуха во многих регионах мира. Как и в 2020 году, наблюдавшиеся в 2021 году жаркие и сухие условия усугубили распространение лесных пожаров на западе Северной Америки, вызвав повсеместное повышение $\text{PM}_{2.5}$ до уровней, способных повлиять на здоровье человека. По мере потепления климата на протяжении текущего столетия ожидается рост лесных пожаров и сопутствующего загрязнения воздуха даже при сценарии с низким уровнем выбросов. В дополнение к воздействиям на здоровье человека, растущее загрязнение воздуха также повлияет на состояние экосистемы за счет увеличения уровня атмосферного осаджения.

Ожидается, что потепление климата также приведет в XXI веке к увеличению частоты, интенсивности и продолжительности тепловых волн. Это может привести к росту числа эпизодов плохого качества воздуха над сильно загрязненными территориями и к деградации качества воздуха в тех районах, где уровень выбросов не обязательно будет высоким, — явлению, известному как «климатическое наказание». Если сжигание ископаемого топлива в развивающихся регионах мира будет продолжаться, то загрязнение озоном в этих регионах также увеличится, причем пятая часть увеличения уровня озона будет вызвана изменением климата.

Долгосрочные наземные и спутниковые наблюдения за содержанием в атмосфере аэрозольных частиц свидетельствуют об уменьшении количества аэрозолей в большей части мира, что приводит, с одной стороны, к улучшению качества воздуха, а с другой стороны, к уменьшению охлаждения атмосферы,

⁵ Природоохранные климатические решения предполагают сохранение, восстановление экосистем и более эффективное управление ими для удаления диоксида углерода из атмосферы и сокращения выбросов парниковых газов.

обеспечиваемого аэрозольными частицами, экранирующими солнечную радиацию. Однако если сценарий с низким уровнем выбросов углерода будет реализован по всему миру, краткосрочное потепление за счет снижения количества аэрозолей в конечном итоге будет сведено на нет благодаря более медленному снижению концентраций парниковых газов, и атмосфера начнет охлаждаться.

Будущий мир, в котором будет реализован сценарий с низким уровнем выбросов углерода, также выиграет от сокращения осаджений из атмосферы соединений азота и серы на поверхность Земли, где они могут нанести ущерб экосистемам в результате закисления и эвтрофикации. Реакция качества воздуха и здоровья экосистемы на предполагаемые сокращения выбросов в будущем будет отслеживаться станциями ГСА ВМО по всему миру, что позволит количественно оценить эффективность политики, направленной на ограничение изменения климата и улучшение качества воздуха.

Ссылки

- 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>.
- European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP, Co-operative Program for Monitoring and Evaluation of the Long-range Transmission of Air Pollutants in Europe). *Transboundary Particulate Matter, Photo-oxidants, Acidifying and Eutrophying Components: Status Report 1/2021*; Norwegian Meteorological Institute, 2021. ISSN 1504-6192. https://emep.int/publ/reports/2021/EMEP_Status_Report_1_2021.pdf.
- Fu, J. S.; Carmichael, G. R.; Dentener, F. et al. Improving Estimates of Sulfur, Nitrogen, and Ozone Total Deposition through Multi-Model and Measurement-Model Fusion Approaches. *Environmental Science & Technology* **2022**, 56 (4), 2134–2142. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c05929>.
- Geiser, L. H.; Nelson, P. R.; Jovan, S. E. et al. Assessing Ecological Risks from Atmospheric Deposition of Nitrogen and Sulfur to US Forests Using Epiphytic Macrolichens. *Diversity* **2019**, 11 (6), 87. <https://doi.org/10.3390/d11060087>.
- Gladson, L. A.; Cromar, K. R.; Ghazipura, M. et al. Communicating Respiratory Health Risk among Children Using a Global Air Quality Index. *Environment International* **2022**, 159, 107023. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.107023>.
- Hettelingh, J.-P.; Posch, M.; Slootweg, J. *European Critical Loads: Database, Biodiversity and Ecosystems at Risk – CCE Final Report 2017*; Coordination Centre for Effects, RIVM Report 2017-0155; RIVM: Netherlands, 2017. doi:10.21945/RIVM-2017-0155. <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2017-0155.pdf>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (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*. Masson-Delmotte, V.; Zhai, P.; Pirani, A. et al. Eds. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA. In press. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/>.
- 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>.
- Lynch, J.A.; Phelan, J.; Pardo, L.H. et al. 2020. *Detailed Documentation of the National Critical Load Database (NCLD) of Sulfur and Nitrogen (version 3.1)*; National Atmospheric Deposition Program: Wisconsin, 2020.
- Moran, M. D.; Ménard, S.; Pavlovic, R. et al. Recent Advances in Canada's National Operational AQ Forecasting System. In *Air Pollution Modeling and its Application XXII*; Steyn, D. G.; Builtjes, P. J. H.; Timmermans, R. M. A., Eds.; NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security; Springer Netherlands: Dordrecht, 2014; 215–220. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5577-2_37.
- Pausas, J. G.; Keeley, J. E. Wildfires as an Ecosystem Service. *Frontiers in Ecology and the Environment* **2019**, 17 (5), 289–295. <https://doi.org/10.1002/fee.2044>.
- Pavlovic, R.; Chen, J.; Anderson, K. et al. The FireWork Air Quality Forecast System with Near-Real-Time Biomass Burning Emissions: Recent Developments and Evaluation of Performance for the 2015 North American Wildfire Season. *Journal of the Air & Waste Management Association* **2016**, 66 (9), 819–841. <https://doi.org/10.1080/10962247.2016.1158214>.
- Romanov, A. A.; Tamarovskaya, A. N.; Gusev, B. A. et al. Catastrophic PM_{2.5} Emissions from Siberian Forest Fires: Impacting Factors Analysis. *Environmental Pollution* **2022**, 306, 119324. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119324>.
- United Nations Environment Programme (UNEP). *Spreading Like Wildfire: The Rising Threat of Extraordinary Landscape Fires*. UNEP: Nairobi, 2022. https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/38372/wildfire_RRA.pdf.
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). *Power Plant Emission Trends* web page. 2022. <https://www.epa.gov/airmarkets/power-plant-emission-trends>.
- Wintjen, P.; Schrader, F.; Schaap, M. et al. Forest-Atmosphere Exchange of Reactive Nitrogen in a Remote Region – Part I: Measuring Temporal Dynamics. *Biogeosciences* **2022**, 19 (2), 389–413. <https://doi.org/10.5194/bg-19-389-2022>.
- World Health Organization (WHO). *WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM_{2.5} and PM₁₀), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and*

- Carbon Monoxide*; WHO: Geneva, 2021. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>.
- World Meteorological Organization (WMO). *WMO Aerosol Bulletin, No. 4: Aerosols from Biomass Burning*; WMO: Geneva, 2021.
- Zanis, P.; Akritidis, D.; Turnock, S. et al. Climate Change Penalty and Benefit on Surface Ozone: A Global Perspective Based on CMIP6 Earth System Models. *Environmental Research Letters* **2022**, 17 (2), 024014. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4a34>.
- Zhao, W.; Zhao, Y.; Ma, M. et al. Long-Term Variability in Base Cation, Sulfur and Nitrogen Deposition and Critical Load Exceedance of Terrestrial Ecosystems in China. *Environmental Pollution* **2021**, 289, 117974. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117974>.
- Zheng, B.; Tong, D.; Li, M. et al. Trends in China's Anthropogenic Emissions since 2010 as the Consequence of Clean Air Actions. *Atmospheric Chemistry and Physics* **2018**, 18 (19), 14095–14111. <https://doi.org/10.5194/acp-18-14095-2018>.

Выражение признательности и ссылки

О. Р. Купер (Редакционный совет) получил поддержку в форме соглашения о сотрудничестве Национального управления по исследованию океанов и атмосферы (НУОА) с Объединенным институтом исследований в области наук об окружающей среде (CIRES), NA17OAR4320101.

Ресурсы в поддержку моделирования GEOS-CF были предоставлены программой НАСА по высокопроизводительным вычислениям (ВПВ) через Центр моделирования климата НАСА (ЦМКН) в Центре космических полетов НАСА им. Годдарда. Вся выходная продукция моделей хранится централизованно в ЦМКН и находится в свободном доступе (https://gmao.gsfc.nasa.gov/weather_prediction/GEOS-CF/data_access/).

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 Мировом центре данных по химически активным газам, которые поддерживаются Норвежским институтом исследования воздуха, Норвегия.

Данные по атмосферному осаждению, собранные в рамках программы ГСА при поддержке Членов ВМО и содействующих сетей, доступны в Мировом центре данных по химии осадков, который поддерживается Лабораторией ресурсов атмосферы НУОА Соединенных Штатов Америки.

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: Научно-консультативной группы по аэрозолям, Научно-консультативной группы по применениям, Научно-консультативной группы ГСА по проекту метеорологических исследований городской среды, Научно-консультативной группы по химически активным газам, Научно-консультативной группы по суммарным атмосферным осадениям и Руководящего комитета Глобальной информационно-прогностической системы по качеству воздуха.

Редакционный совет

Председатель: Оуэн Р. Купер (председатель Научно-консультативной группы ГСА ВМО по химически активным газам), CIRES, Университет Колорадо Боулдер и Лаборатория химических наук НУОА (ЛХН), США

Члены: Грег Кармайл (председатель Научного руководящего комитета по проблемам загрязнения окружающей среды и химии атмосферы ГСА ВМО), Университет Айовы, США; Паоло Ладж (председатель Научно-консультативной группы ГСА ВМО по аэрозолям), Университет Гренобль Альпы, Франция и Университет Хельсинки, Финляндия; Джули М. Найсли (член Научного руководящего комитета по проблемам загрязнения окружающей среды и химии

атмосферы ГСА ВМО), Университет Мэриленда, США, и НАСА, США; Венсан-Анри Пёч (председатель Научно-консультативной группы ГСА ВМО по применениям), директор Службы мониторинга атмосферы в рамках программы «Коперник» (СМАК), Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды (ЕЦСПП) (Рединг, Соединенное Королевство; Бонн, Германия); Ранжит С. Сохи (председатель Научно-консультативной группы ГСА ВМО по исследованиям городской метеорологии и окружающей среды), Университет Хартфордшира, Соединенное Королевство; Ариэль Штайн (сопредседатель Научно-консультативной группы ГСА ВМО по суммарным атмосферным осадениям), Лаборатория глобального мониторинга НУОА, Боулдер, США; Джон Уокер (сопредседатель Научно-консультативной группы ГСА ВМО по суммарным атмосферным осадениям), Агентство по охране окружающей среды США, Дарем, США.

Все авторы в алфавитном порядке

Майкл Белл, Служба национальных парков, Лейквуд, США; Кристиан Брюммер, Тюненский институт климатически оптимизированного сельского хозяйства, Брауншвейг, Германия; Лаура Гальярдо Кленнер, Центр исследований в области климата и устойчивости (КУ)2, Сантьяго, Чили, и кафедра геофизики, факультет физико-математических наук, Университет Чили, Сантьяго, Чили; Лора Гладсон, Институт управления городским хозяйством им. Маррона, Нью-Йоркский университет, США и Медицинская школа им. Гроссмана Нью-Йоркского университета, Нью-Йорк, США; Мартина Колло Кён, Федеральное бюро метеорологии и климатологии МетеоСвис, Пайерн, Швейцария; Кевин Кромар, Институт управления городским хозяйством им. Маррона, Нью-Йоркский университет, США и

Медицинская школа им. Гроссмана Нью-Йоркского университета, Нью-Йорк, США; Оуэн Р. Купер, CIRES, Университет Колорадо Боулдер, США, и ЛХН НУОА, США; Родриго Муньос-Альписар, Министерство охраны окружающей среды Канады, правительство Канады, Канада; К. Эмма Ноулэнд, Государственный университет Моргана (ГЕСТАР-II), Балтимор, США, и Центр космических полетов НАСА им. Годдарда, Бюро глобального моделирования и ассимиляции (ГМАО), Гринбелт, США; Раденко Павлович, Министерство охраны окружающей среды Канады, правительство Канады, Канада; Марк Паррингтон, Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды, департамент программы «Коперник», Рединг, Соединенное Королевство; Бонн, Германия; Венсан-Анри Пёч, Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды, департамент программы «Коперник», Рединг, Соединенное Королевство; Бонн, Германия; Ранжит С. Сохи, Центр по научным исследованиям изменения климата (СЗР), Университет Хартфордшира, Соединенное Королевство; Адмир Кресо Таргино, Федеральный технологический университет (UTFPR), Бразилия; Стивен Тернок, Центр климатических предсказаний и исследований имени Гадлея, Эксетер, Соединенное Королевство; Джон Уокер, Агентство по охране окружающей среды США, Дарем, США; Хильде Фагерли, Норвежский метеорологический институт, Осло, Норвегия; Йоханнес Флемминг, Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды, департамент программы «Коперник», Рединг, Соединенное Королевство; Бонн, Германия; Томас Шойшнер, Umweltbundesamt (UBA), Дессау-Росслау, Германия; Цзяньлинь Шэнь, Институт субтропического сельского хозяйства, Китайская академия наук, Чанша, Китай; Элизабет Эндрюс, CIRES, Университет Колорадо Боулдер, США, и Лаборатория по изучению системы Земля НУОА, Боулдер, США.

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
Эл. почта: wdcgg@met.kishou.go.jp
Веб-сайт: <https://gaw.kishou.go.jp/>

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

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