



БЮЛЛЕТЕНЬ ВМО ПО КАЧЕСТВУ ВОЗДУХА И КЛИМАТУ

Введение

Продолжающееся изменение климата, вызванное накоплением парниковых газов в атмосфере, длится от нескольких десятилетий до нескольких столетий и приводит к изменениям окружающей среды по всему миру. Загрязнение воздуха вблизи поверхности Земли, в свою очередь, происходит в сроки от нескольких дней до нескольких недель, а его пространственные масштабы варьируются от местных (например, городские центры) до региональных (например, восточная часть Соединенных Штатов Америки, север Индии или Амазония). Несмотря на эти существенные различия, качество воздуха и изменение климата тесно взаимосвязаны. В *Бюллетене ВМО по качеству воздуха и климату* ежегодно публикуется информация о качестве воздуха и его связи с изменением климата, а также приводится анализ географического распределения традиционных загрязняющих веществ и изменений уровня их содержания в атмосфере.

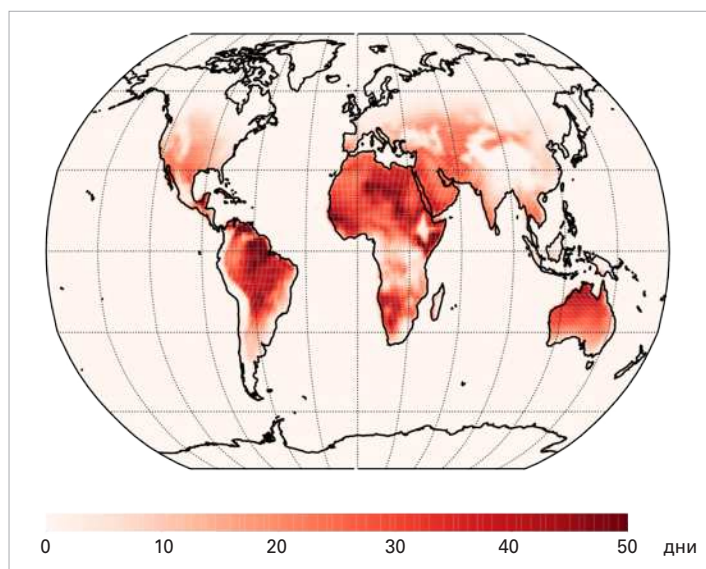


Рисунок 1. Прогнозируемое на основе 27 численных моделей глобально усредненное изменение количества дней в году с максимальной суточной приземной температурой выше 35 °C в сопоставлении с базовыми показателями 1850–1900 годов в мире, где произойдет потепление на 1,5 °C (исходя из совместного социально-экономического пути SSP5-8.5)

Источник: Рисунок подготовлен с использованием данных Интерактивного атласа Рабочей группы I МГЭИК: <https://interactive-atlas.ipcc.ch/>

К традиционным загрязнителям относятся короткоживущие химически активные газы, такие как озон — малая газовая составляющая, одновременно являющаяся распространенным загрязнителем воздуха и парниковым газом, нагревающим атмосферу, и твердые частицы (PM) — широкий спектр взвешенных в атмосфере мельчайших частиц (обычно называемых аэрозолями), которые пагубно влияют на здоровье человека и в силу своих комплексных характеристик могут как охлаждать, так и нагревать атмосферу.

Качество воздуха и климат связаны, поскольку существует взаимосвязь между влияющими на них химическими соединениями, а также потому, что изменения в качестве воздуха неизбежно влекут за собой изменения в климате и наоборот. Деятельность человека, в результате которой в атмосферу выбрасываются долгоживущие парниковые газы, также приводит к увеличению концентрации менее долгоживущего озона и твердых частиц в атмосфере. Например, при сжигании ископаемых видов топлива (одного из основных источников диоксида углерода (CO₂)) в атмосферу также выбрасывается оксид азота (NO), что может приводить к образованию озона и нитратных аэрозолей. Аналогичным образом в результате некоторых видов сельскохозяйственной деятельности (которые являются одним из основных источников парникового газа метана) в атмосферу выбрасывается аммиак, который затем образует аэрозоли аммония. Качество воздуха, в свою очередь, воздействует на здоровье экосистем через атмосферное осаждение (процесс, при котором загрязнители воздуха из атмосферы оседают на поверхности Земли), что также указывает на связь качества воздуха и климата. Осаждение азота, серы и озона может отрицательно сказываться на услугах, предоставляемых природными экосистемами, таких как чистая вода, обеспечение биоразнообразия и хранение углерода, а также может влиять на урожайность в сельскохозяйственных системах.

В настоящем издании *Бюллетеня ВМО по качеству воздуха и климату* приводится обновленная информация о глобальном распределении твердых частиц за 2022 год и рассматриваются пути влияния волн тепла на состав атмосферы. Ожидается, что изменение климата усилит волны тепла (рисунок 1);

так, в 2022 году наблюдалось несколько значительных волн тепла. Более подробно взаимосвязь между твердыми частицами, климатом и качеством воздуха рассматривается в двух тематических исследованиях. Возросшая степень воздействия природных пожаров в районах, охваченных волнами тепла, может приводить к увеличению аэрозольного загрязнения, как это произошло в августе — сентябре 2022 года над западной частью Северной Америки, в то время как в Европе в августе 2022 года в результате вторжения воздушных масс из пустынь Северной Африки наблюдались волны тепла и пустынная пыль. Кроме того, в настоящем издании Бюллетеня рассматривается вопрос о том, как устойчивая волна тепла, охватившая Европу в июне-августе 2022 года, повлияла на концентрацию приземного озона. В дополнение к этому в Бюллетене обобщаются новые данные, проливающие свет на то, в какой степени природные пожары приводят к осаждению азота, которое может отрицательно влиять на экосистемы, а также описываются многочисленные и сложные связи между сельским хозяйством и качеством воздуха. Наконец, в заключительной части Бюллетеня рассматривается вопрос о том, как эффект городского острова тепла может усугублять ситуацию с высокими температурами и какую пользу городским центрам может принести наличие парков, благодаря которым происходит охлаждение окружающего воздуха и поглощение CO_2 .

Глобальный уровень концентрации твердых частиц в 2022 году, зарегистрированный Службой мониторинга атмосферы в рамках программы «Коперник»

Йоханнес Флемминг, Венсан-Анри Пёш

Вдыхание твердых частиц размером менее 2,5 микрометров ($\text{PM}_{2.5}$) в течение длительного времени представляет серьезную опасность для здоровья (WHO, 2021). На глобальном уровне к загрязнению $\text{PM}_{2.5}$ в разной степени приводят антропогенные и природные факторы, в том числе выбросы от сжигания ископаемых видов топлива, природные пожары и разносимая ветром пустынная пыль. На рисунке 2 б), подготовленном с использованием данных по $\text{PM}_{2.5}$ на основе реанализа Службы мониторинга атмосферы в рамках программы «Коперник» (СМАК), показаны средние поверхностные концентрации $\text{PM}_{2.5}$ за 2003–2022 годы и аномалии (абсолютные разницы) в 2022 году по сравнению со средними значениями за 2003–2022 годы (рисунок 2 а)).

В 2022 году по сравнению с 2021 годом на аномалии $\text{PM}_{2.5}$ в гораздо меньшей степени повлияли крупные пожары (*Бюллетень ВМО по качеству воздуха и климату № 2*). Скорее, более существенно на приземные концентрации $\text{PM}_{2.5}$ повлияли тенденции в области антропогенных выбросов и годовая изменчивость выбросов пустынной пыли. Положительные аномалии $\text{PM}_{2.5}$, вызванные пожарами, наблюдались в некоторых районах

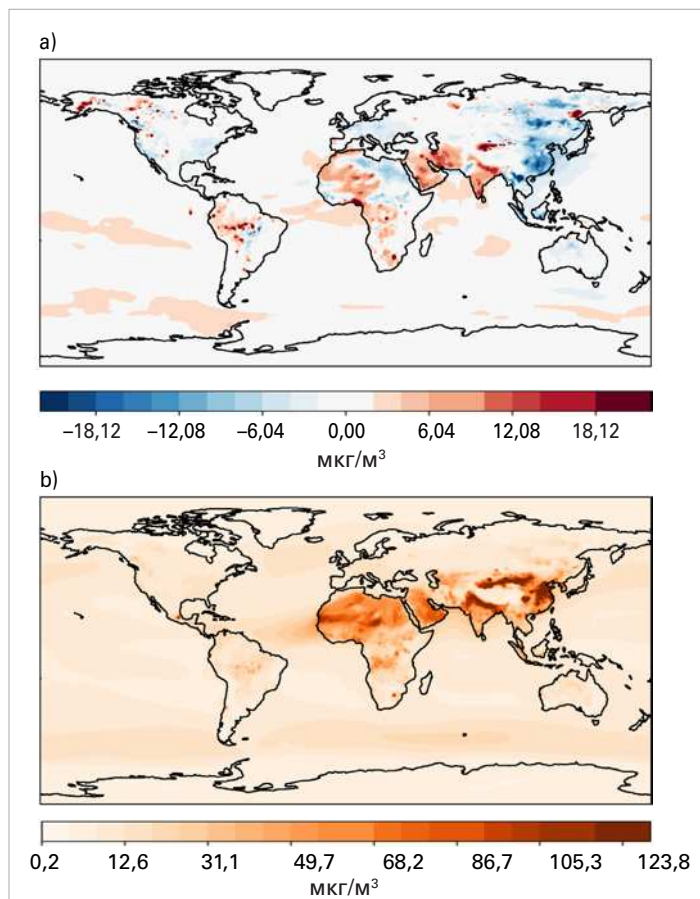


Рисунок 2. а) Аномалия (абсолютная разница) средних приземных концентраций $\text{PM}_{2.5}$ ($\text{мкг}/\text{м}^3$) в 2022 году по данным реанализа СМАК в сравнении с б) средним значением за 2003–2022 годы. Низкие концентрации $\text{PM}_{2.5}$ в мировом океане в значительной степени обусловлены наличием частиц морской соли природного происхождения. В системе реанализа СМАК собраны данные об оптической плотности аэрозоля (ОПА), полученные со спутника с помощью спектро радиометра для получения изображений среднего разрешения (MODIS) и усовершенствованного радиометра с траекторным сканированием (AATSr). Кроме того, был использован набор данных о выбросах во время природных пожаров Глобальной системы ассимиляции данных о пожарах (ГСАДП).

Источник: Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды (ЕЦСПП)/СМАК

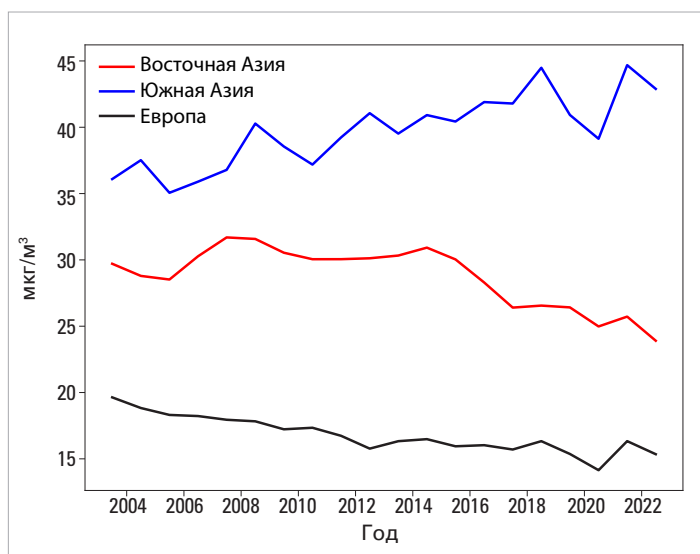


Рисунок 3. Временные ряды среднегодовой приземной концентрации $\text{PM}_{2.5}$ ($\text{мкг}/\text{м}^3$) за 2003–2022 годы для различных регионов: Восточная Азия (красный), Южная Азия (синий) и Европа (черный)

Источник: ЕЦСПП/СМАК

бассейна реки Амазонки и на Аляске из-за активного сезона пожаров в июле и августе 2022 года, а также над Южной Африкой из-за пожарной активности в период с июля по сентябрь. Над большей частью пустыни Сахара, за исключением ее северо-западной окраины, активность пыльных бурь была в целом ниже обычной, в то время как в пустыне Такла-Макан и на большей части Аравийского полуострова количество пыли было больше обычного, что повлекло за собой повышение уровня $PM_{2.5}$. Как и в 2021 году, положительная аномалия $PM_{2.5}$ над Индией и отрицательные аномалии над Китаем, Европой и восточной частью Соединенных Штатов Америки в 2022 году в основном являлись проявлением повышенных или пониженных антропогенных выбросов в соответствующих регионах (рисунок 2 а)). В целом в 2022 году аномалии $PM_{2.5}$ соответствовали долгосрочным трендам, при этом в Восточной Азии и Европе концентрация $PM_{2.5}$ уменьшилась, а в Южной Азии — увеличилась (рисунок 3).

Механизмы, связывающие волны тепла и твердые частицы: природные пожары и вторжение пустынной пыли

Питер Коларко, Лючия Мона

Несмотря на то, что, как отмечается в предыдущем разделе, в 2022 году крупные пожары и пыльные бури в целом наблюдались реже, заметные явления подобного рода все же имели место. Их связь с волнами тепла, высокой концентрацией аэрозолей и загрязнением воздуха рассматривается в следующих пунктах на основе двух примеров за 2022 год: природных пожаров на северо-западе Соединенных Штатов Америки и вторжения пустынной пыли в Европе.

Экстремальная аномалия температуры воздуха, сохраняющаяся в течение многих дней во время волны тепла, может приводить к формированию благоприятной среды для распространения пожаров.

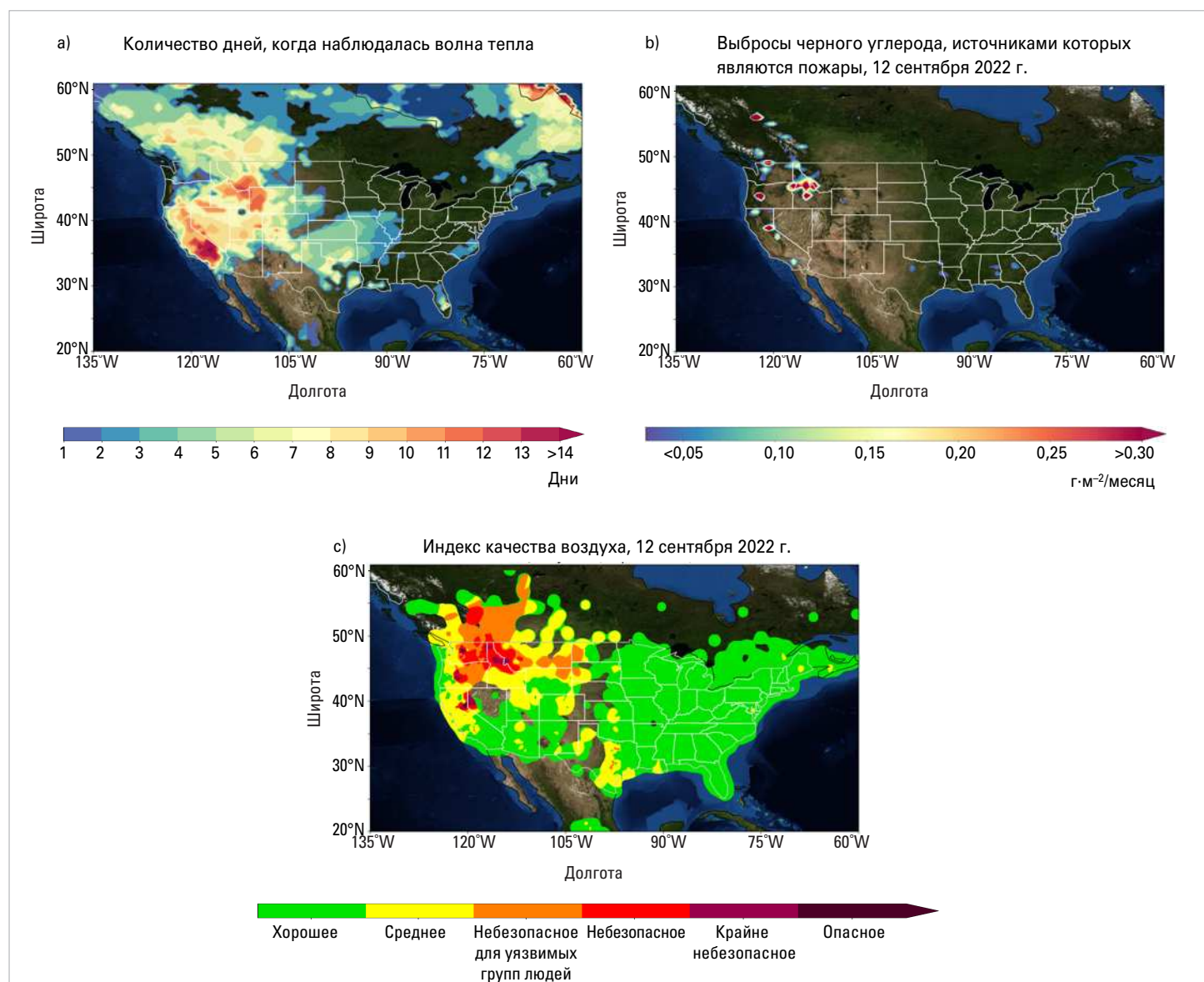


Рисунок 4. а) Реанализ атмосферных данных MERRA-2 NASA позволяет обнаружить высокую частоту волн тепла в западной части США в сентябре 2022 года. б) Волны тепла, наблюдаемые на северо-западе США, связаны с высоким уровнем выбросов в результате природных пожаров. в) Эти условия привели к загрязнению воздуха в большей части региона, о чем свидетельствуют данные, предоставленные AQIC США. *Источник:* Центр космических полетов НАСА им. Годдарда, Управление глобального моделирования и ассимиляции (УГМА); AQIC США

Засушливые условия и высокие температуры во время волны тепла повышают вероятность возгораний и быстрого распространения пожаров, поглощающих сухую, легко воспламеняющуюся растительность. Такие ситуации могут приводить к тому, что объем выбросов аэрозолей в атмосферу превысит аналогичный показатель в отсутствие волн тепла. Пример этого представлен на рисунке 4, на котором результаты реанализа проекта «Ретроспективный анализ современной эры для научных исследований и применений, версия 2» (MERRA-2) Национального управления по авионавигации и исследованию космического пространства (НАСА) свидетельствуют о том, что продолжительная волна тепла в сентябре 2022 года (рисунки 4 а)) была связана с аномально высоким уровнем горения биомассы на северо-западе Соединенных Штатов Америки (рисунки 4 б)), что, по

сообщениям Агентства по охране окружающей среды (АООС) США, привело к ухудшению качества воздуха в большей части региона (рисунки 4 с)).

В Европе, в свою очередь, обычно наблюдается два вида волн тепла: тепловой купол и приток воздушных масс с юга. В последнем случае волны тепла часто возникают на фоне вторжения частиц пустынной пыли из пустынь Северной Африки. Здесь, в сравнении с природными пожарами, в основном наблюдается обратная причинно-следственная связь: когда режим циркуляции приводит к вторжению пустынной пыли в Европу, повышение температуры происходит из-за вторжения горячего воздуха из пустынных районов. Кроме того, можно допустить существование механизма положительной обратной связи: сухая и жаркая атмосфера способствует процессу опустынивания в

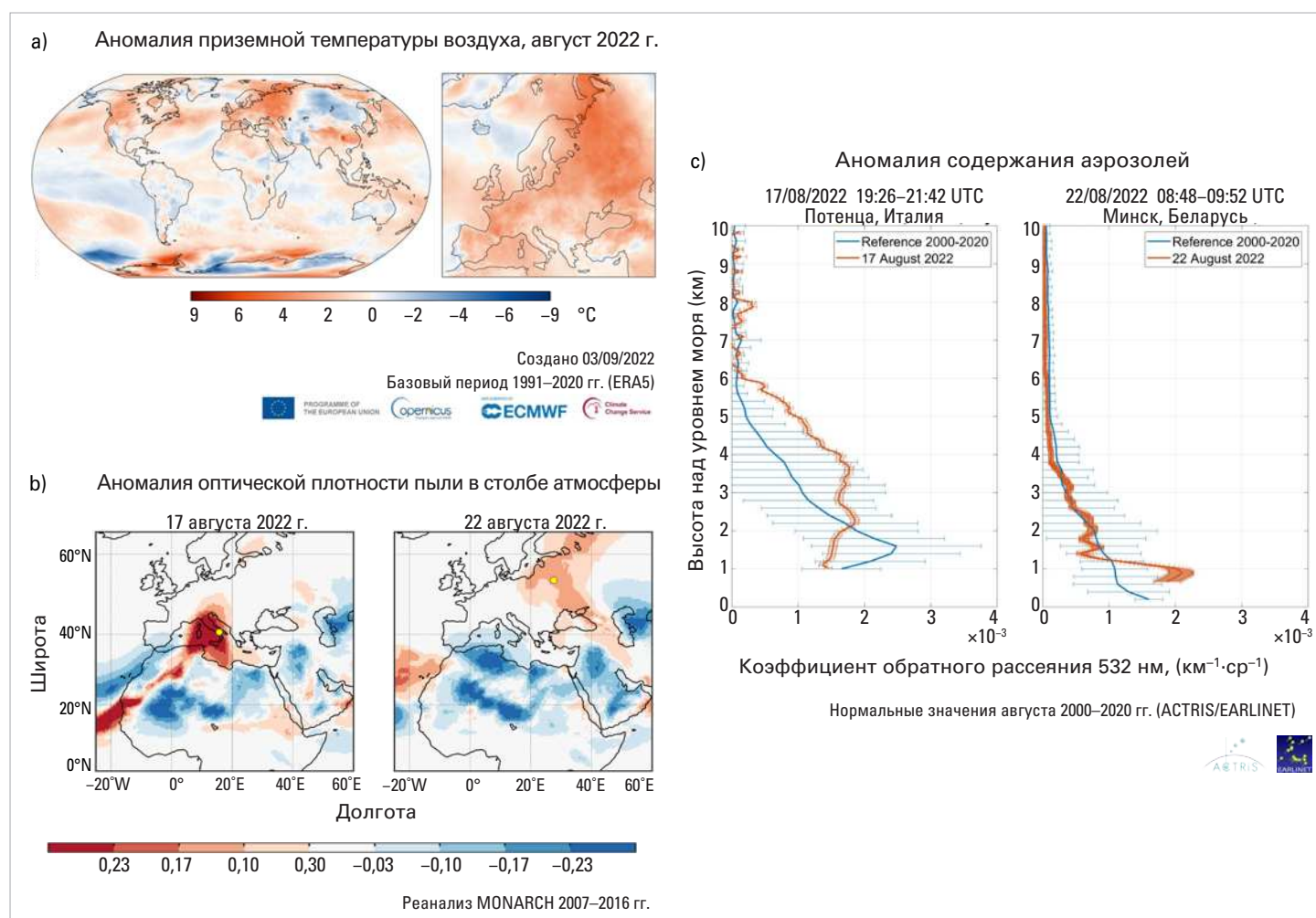


Рисунок 5. а) Климатологический анализ свидетельствует об аномалиях приземной температуры воздуха в августе 2022 года по всей Европе, связанных с аномальным вторжением пустынной пыли из Северной Африки во второй половине месяца (б)), которая пересекла Средиземное море и достигла Восточной Европы. В результате этого вторжения содержание аэрозоля, зарегистрированное над центральной частью Средиземного моря и Восточной Европой, значительно превысило климатологические средние значения (рисунки с)). Профили обратного аэрозольного рассеяния в с) соответствуют желтым точкам в б). Обратное аэрозольное рассеяние указывает на степень рассеяния солнечного излучения аэрозольными частицами, находящимися в атмосфере, и зависит от характеристик аэрозолей (таких как состав и размеры) и их концентраций.

Источники:

- Служба по вопросам изменения климата в рамках программы «Коперник»/ЕЦСПП
- Барселонский центр суперкомпьютерных вычислений
- Национальный совет по научным исследованиям, Институт методологии анализа окружающей среды (CNR, IMAA)/научно-исследовательская инфраструктура для изучения аэрозолей, облачности и малых газовых составляющих — европейская лидарная сеть по исследованию аэрозолей (ACTRIS-EARLINET)

Европе, в результате чего в европейских странах могут увеличиваться концентрации аэрозолей, поступающих с поверхности почвы.

На рисунке 5 показана волна тепла, охватившая Европу во второй половине августа 2022 года, и продемонстрирована ее связь с вторжением пустынной пыли. Длительная аномалия температуры, зарегистрированная Службой по вопросам изменения климата в рамках программы «Коперник» (рисунок 5 а)), связана с соответствующей аномалией количества пыли (которая рассчитывается на основе показателя, известного как оптическая плотность

пыли) по сравнению со средним климатологическим значением, предоставленным Барселонским центром суперкомпьютерных вычислений (рисунок 5 б)) (Di Tomaso et al., 2022). Следует отметить, что эта аномалия пыли была спрогнозирована при помощи мультимодельного ансамбля Системы предупреждения и оценки песчаных и пыльных бурь. Хотя вторжение пустынной пыли в Средиземноморье и Европу является привычным явлением в августе, но в этот раз оно отличалось аномально высоким уровнем общего количества пыли. Наблюдения за аэрозолями в данном регионе в этот период проводились с помощью

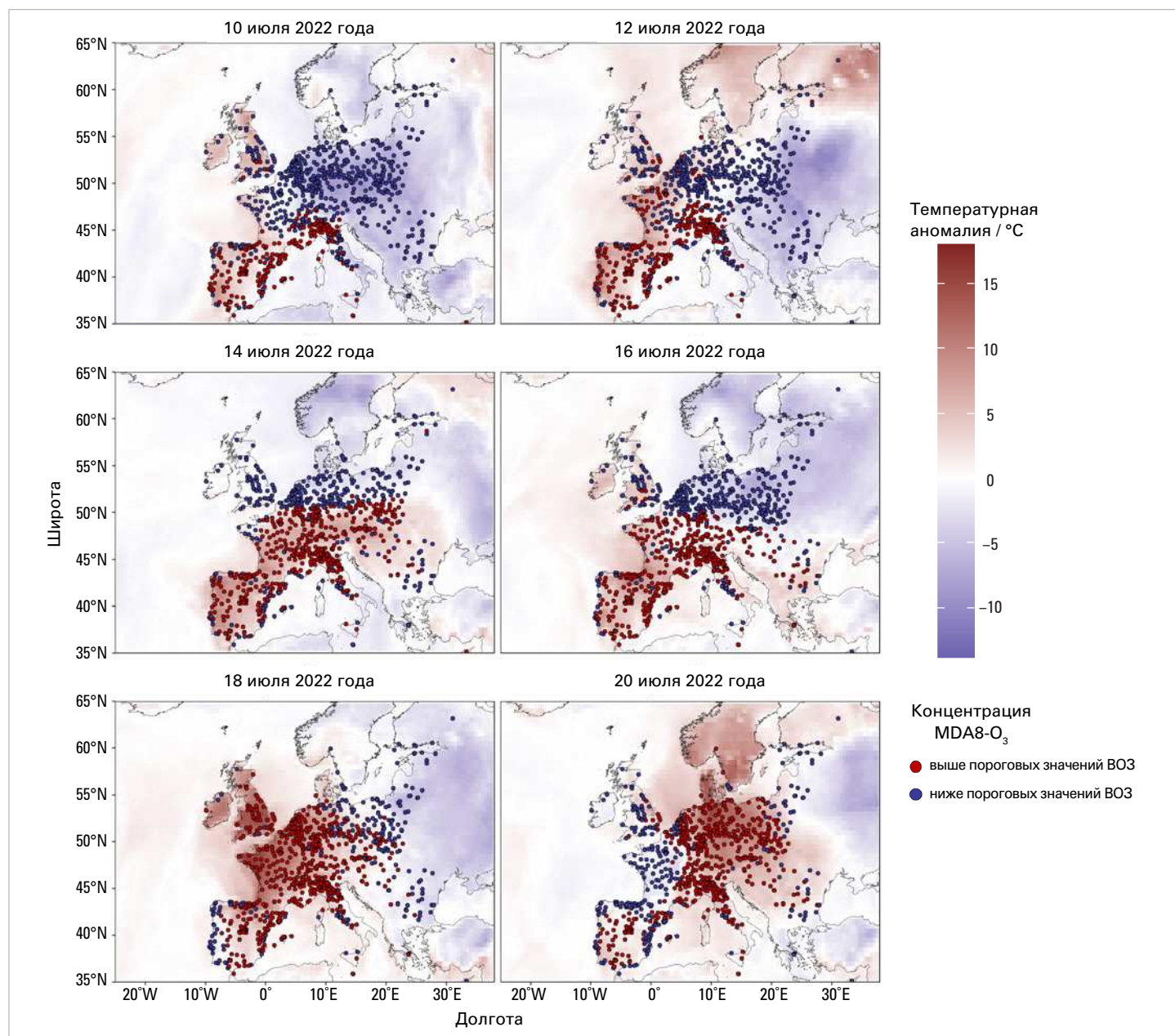


Рисунок 6. Превышение уровня содержания озона (O_3) и температурные аномалии, зарегистрированные на станциях мониторинга в европейских городах с 10 по 21 июля 2022 года. Уровень содержания озона, установленный ВОЗ в ее рекомендациях по качеству воздуха, касающихся озона, считается превышенным в том случае, когда максимальная суточная концентрация озона, измеряемая в течение 8 часов ($MDA8-O_3$), составляет более 100 мкг/м^3 . Температурная аномалия рассчитывается как разница между максимальной суточной температурой и медианным показателем максимальной суточной температуры летом (июнь-август) 2022 года в конкретном месте в Северном полушарии.

Источник: Данные наблюдений за концентрацией приземного озона предоставлены Министерством охраны окружающей среды, продовольствия и сельскохозяйственного развития Соединенного Королевства (<https://uk-air.defra.gov.uk/>) и Европейским агентством по окружающей среде (ЕАОС) (<https://www.eea.europa.eu/themes/air/explore-air-pollution-data>). Смоделированные данные о приземной температуре были загружены с сайта Службы по вопросам изменения климата в рамках программы «Коперник» (2023 г.) (<https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47>).

нескольких платформ, таких как автоматизированная сеть по аэрозолям наземного базирования AERONET, спектрорадиометр космического базирования MODIS, а также лидар и инфракрасный радиолокатор для спутниковых наблюдений облаков и аэрозолей CALIPSO. На рисунке 5 с) показана аномальная аэрозольная нагрузка, наблюдаемая на профилях аэрозолей, которые были получены на станции ACTRIS-EARLINET в Потенце, Италия, где в диапазоне высот 3–6 км над уровнем моря наблюдалось аномально высокое содержание аэрозоля.

Высокая температура и в то же время высокое содержание аэрозолей в атмосфере, а значит и высокое содержание в ней твердых частиц, может воздействовать на здоровье и благополучие человека. Известно, что высокие температуры являются фактором риска для пожилых людей, поскольку они могут приводить, например, к тепловому удару, а также к обострению таких хронических заболеваний, как сердечно-сосудистые и респираторные заболевания (NIEHS, 2022). Поэтому высокая температура и одновременно высокий уровень твердых частиц в атмосфере (например, как следствие природных пожаров или вторжения пустынной пыли) представляет опасность для здоровья значительной части населения.

Влияние волн тепла на приземный озон в Европе

Джеймс Ли, Бет Нельсон, Уилл Драйсдейл, Сэм Уилсон

Хотя на очень большой высоте озон приносит пользу нашей планете, защищая ее от вредного ультрафиолетового излучения, но на уровне земли, где воздействие высокой концентрации озона представляет

опасность для растительности и здоровья человека, он наносит ей ущерб. Между волнами тепла и высоким уровнем содержания приземного озона существует тесная связь. Во время волны тепла, наблюдавшейся в июле 2022 года в Европе, на сотнях станций мониторинга качества воздуха было зарегистрировано превышение уровня содержания озона в 100 мкг/м^3 за 8-часовой период воздействия, установленного Всемирной организацией здравоохранения в ее рекомендациях по качеству воздуха (WHO, 2021). Эти превышения были зарегистрированы после распространения волны тепла по континенту и сначала наблюдались на юго-западе Европы, затем распространились на центральную Европу и, наконец, достигли северо-востока (рисунок 6).

Формирование приземного озона является результатом сложных химических реакций с участием оксидов азота (NO и NO_2 , в совокупности известных как NO_x) и химически активных летучих органических соединений (ЛОС), при этом последние выделяются растениями, попадают в атмосферу при сжигании ископаемых видов топлива или связаны с промышленной деятельностью (рисунок 7). Озон — невидимый газ, но его формирование, как правило, происходит в загрязненной среде, содержащей видимые твердые частицы. Коричневая дымка, которую можно наблюдать в подобной среде, известна как фотохимический смог, который получил свое название благодаря роли солнечного света в запуске химических реакций, приводящих к его появлению. Поскольку образование озона в значительной степени зависит от солнечного света и высоких концентраций химических веществ — прекурсоров, высокие температуры и застойный воздух, возникающие во время волн тепла, в течение нескольких дней приводят к накоплению высоко химически активных веществ и тем самым усугубляют процесс образования озона.

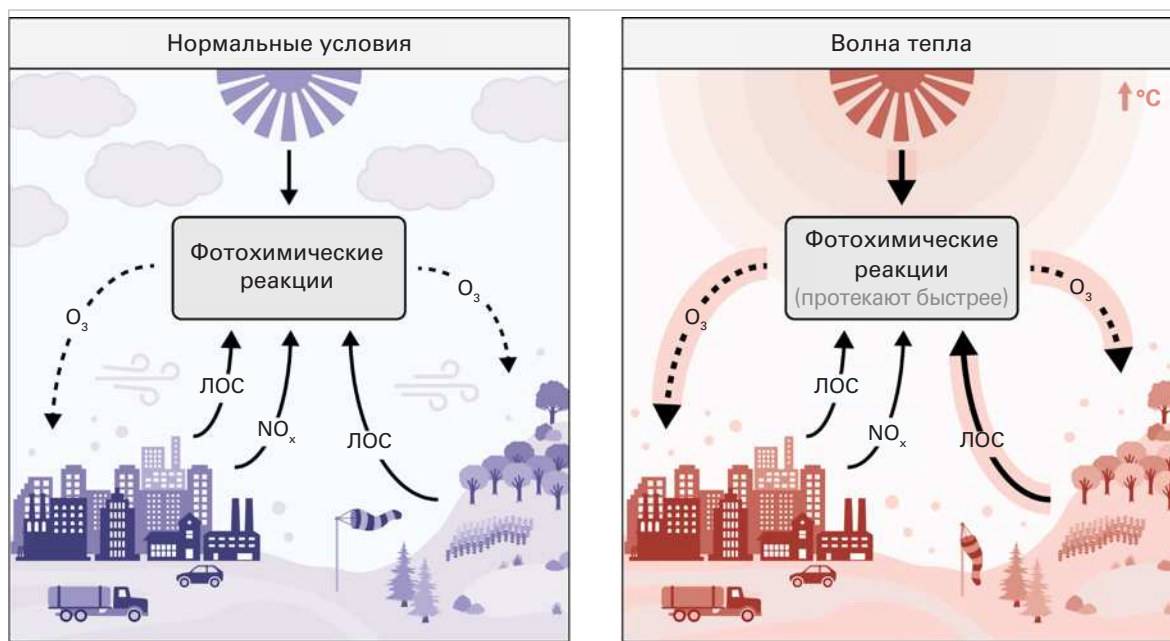


Рисунок 7. Приземный озон (O_3) образуется в результате фотохимических реакций (химических реакций с участием солнечного света) NO_x и ЛОС. Высокие температуры и застойный воздух (справа) приводят к накоплению загрязняющих веществ, ускорению фотохимических процессов и повышенному образованию озона.

Источник: Йоркский университет и Национальный центр наук об атмосфере (химический факультет), Соединенное Королевство Великобритании и Северной Ирландии

Более высокие температуры окружающей среды также способствуют ускоренному протеканию химических реакций в атмосфере, что приводит к повышенному образованию озона (Gouldsbrough et al., 2022). Кроме того, высокие температуры приводят к тому, что растения выделяют больше ЛОС, которые охотно вступают в химические реакции и активно участвуют в формировании озона (Pusede et al., 2015). Во время волн тепла эти биогенные ЛОС часто являются ключевым фактором образования озона.

За последние несколько десятилетий были успешно реализованы стратегии снижения уровня загрязнения окружающей среды, ориентированные на сокращение выбросов автотранспорта и электростанций, в

результате чего во всем Северном полушарии снизился уровень выбросов NO_x . Тем не менее процессы, ведущие к образованию озона, имеют нелинейный характер, то есть одно лишь сокращение NO_x без сопутствующего сокращения ЛОС не обязательно означает сокращение концентрации озона. На самом деле во многих случаях наблюдается обратное явление, и сокращение выбросов NO_x без достаточного сокращения выбросов ЛОС может приводить к повышенному образованию озона. Так произошло во многих городских центрах по всему миру во время режима изоляции, введенного в связи с COVID-19 (Sokhi et al., 2021). Если прибавить к этому еще и волны тепла, то даже весьма существенное сокращение выбросов NO_x может не позволить нейтрализовать влияние волн тепла на скорость образования озона.

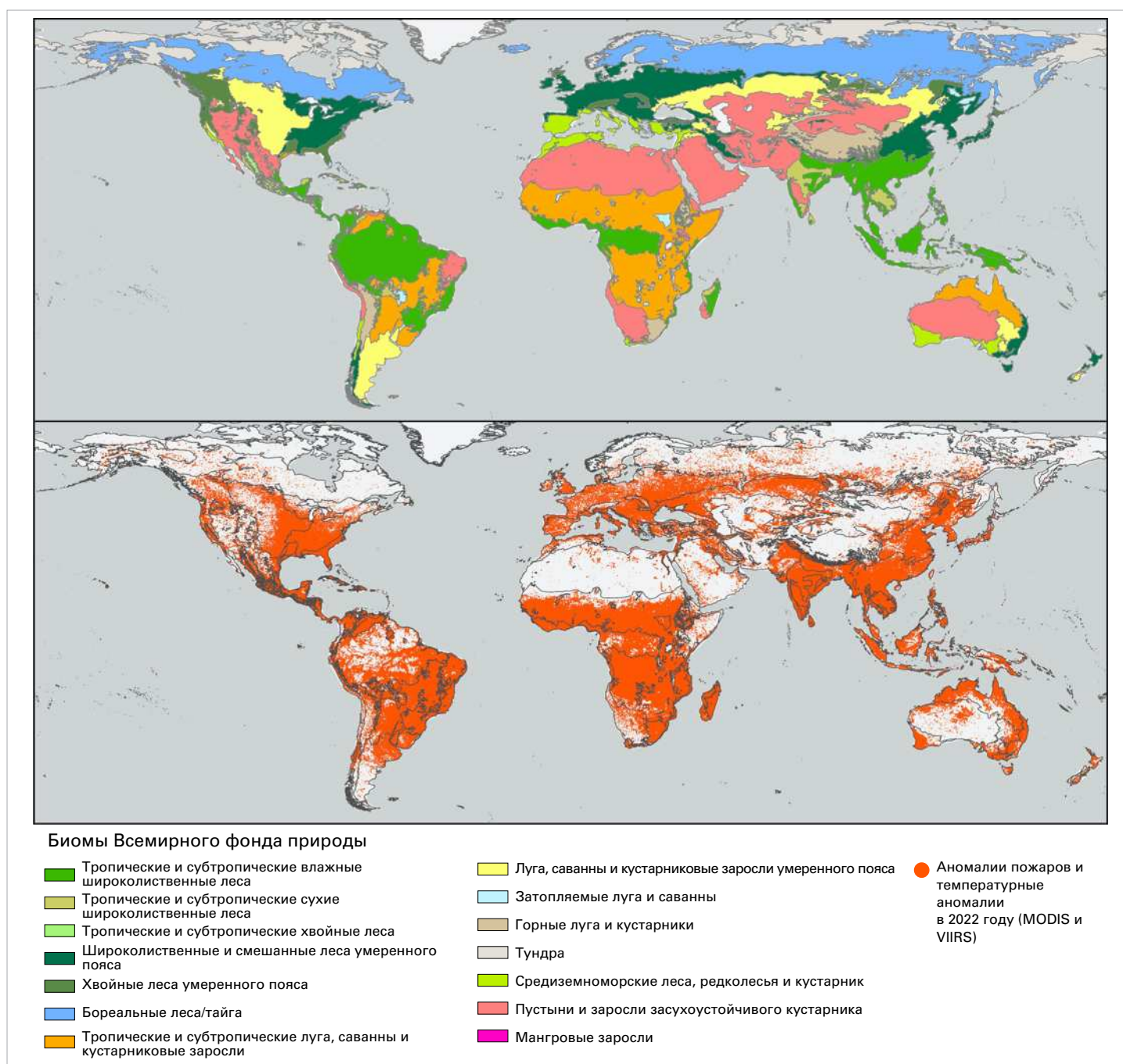


Рисунок 8. Глобальная карта основных биомов (верхняя карта) (Источник: Olson et al, 2001), а также данные о пожарах в 2022 году (нижняя карта), полученные со спутника с помощью спектрорадиометра MODIS и блока радиометров для получения изображений в видимом/инфракрасном диапазоне спектра (VIIRS) (Источник: АООС США/Управление исследований и разработок).

В регионах, где преобладают антропогенные ЛОС, лишь существенное сокращение выбросов последних наряду с сокращением выбросов NO_x может оказаться достаточным для того, чтобы нейтрализовать влияние повышенных выбросов биогенных ЛОС и накопление загрязнителей вследствие высоких температур и застойного воздуха, возникающих во время волн тепла. С течением времени в связи с изменением климата количество экстремальных метеорологических явлений, вероятно, возрастет. Если не обеспечить реализацию стратегий борьбы с загрязнением и эффективное управление ими, это может привести к росту случаев превышения безопасной для здоровья человека концентрации озона (*Бюллетень ВМО по качеству воздуха и климату № 2*).

Выбросы, образующиеся в результате пожаров, являются важным источником атмосферного осаднения азота для подветренных экосистем

Джон Уокер, Джереми Шрёдер, Патрик Кэмпбелл, Рик Сейлор

В результате пожаров, также называемых горением биомассы, в атмосферу выбрасывается большое количество соединений азота (N) (наряду с углеродом, ртутью и многими другими химическими веществами) (Andreae, 2019; Bray et al., 2021). Эти азотсодержащие

частицы и газы, включая оксиды азота (NO_x), аммиак (NH_3) и органические соединения, содержащие азот, перемещаются в подветренном направлении, при этом часть из них возвращается на поверхность Земли в виде влажного и сухого осаднения. Хотя осаднение азота может быть благоприятным с точки зрения удобрения почвы, но во многих регионах мира оно происходит быстрыми темпами, что отрицательно сказывается на здоровье экосистем и, как следствие, на качестве услуг, предоставляемых ими человеку (таких как обеспечение биоразнообразия, чистая питьевая вода, продовольствие и лесохозяйственные продукты, а также хранение углерода). Пожары и связанное с ними осаднение могут также изменять азотный цикл в почве (Goodridge et al., 2018), что может приводить к увеличению почвенных выбросов оксида азота (NO), являющегося прекурсором загрязнителей атмосферы, включая озон и твердые частицы, а также закиси азота (N_2O), представляющей собой мощный парниковый газ. Пожары, которые имеют в основном антропогенный характер (WWF; BCG, 2020), наблюдаются во всех основных биоммах земного шара (van Wees et al., 2022) (рисунок 8).

В недавних исследованиях (Kopltitz et al., 2021; Campbell et al., 2022) подчеркивается воздействие пожаров как крупного, но при этом слабо изученного источника осаднения азота для подветренных экосистем. Например, на рисунке 9 (адаптировано из Campbell et al.,

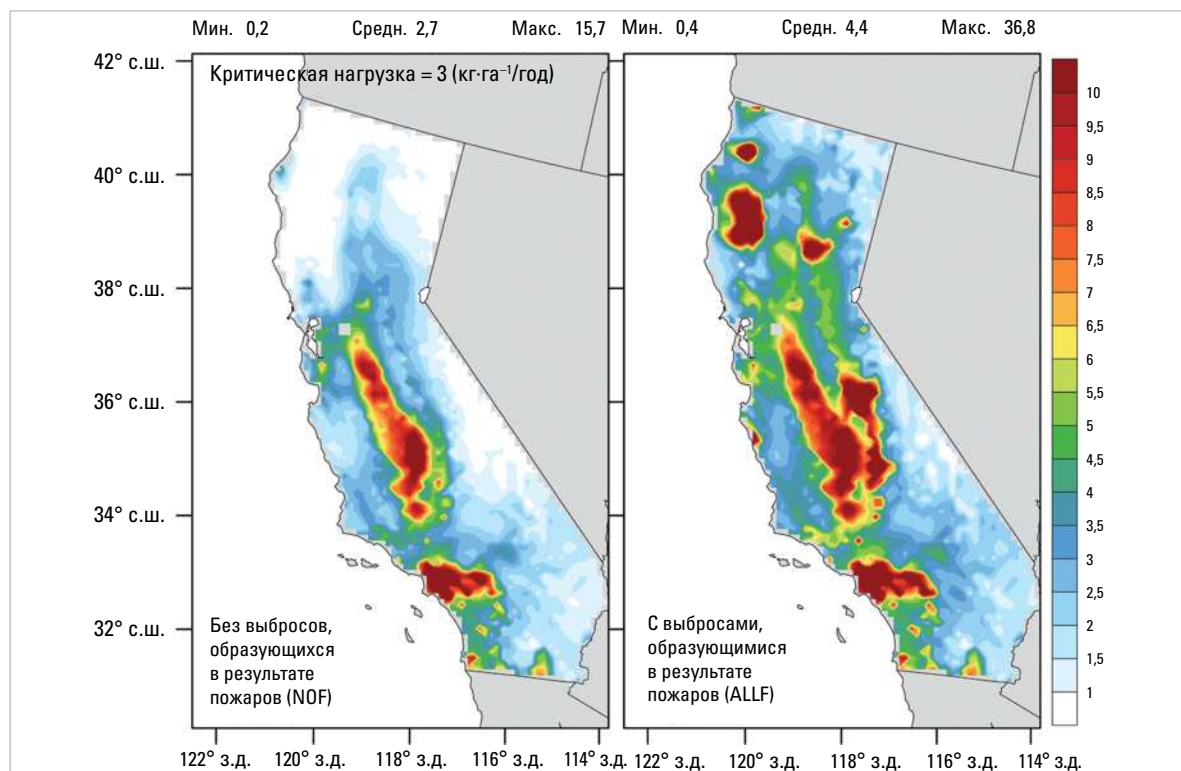


Рисунок 9. Среднегодовое отношение суммарного осаднения азота (кг-га⁻¹/год) к нижнему пределу критической нагрузки (КН) ~3 кг-га⁻¹/год для моделирования в отсутствие пожаров (NOF; слева) и в условиях пожаров (ALLF; справа). Коэффициенты > 1 на цветовой шкале означают превышение критической нагрузки, которое может оказывать отрицательное воздействие на сообщества лишайников, произрастающих в смешанных хвойных лесах Калифорнии, а также на некоторые виды кустарников. В рамках моделирования было рассмотрено 24 типа землепользования, которое осуществляется в том числе в широколиственных лесах, хвойно-лиственных лесах, вечнозеленых широколиственных лесах, вечнозеленых хвойных лесах, других смешанных лесах, лугах, кустарниках, саваннах и на пахотных землях.

Источник: Национальное управление по исследованию океанов и атмосферы (НУОА)/Лаборатория ресурсов атмосферы и Университет Джорджа Мейсона в рамках Института сотрудничества в области спутниковых исследований земной системы (СИССС)

2022) показано, что модель Системы прогнозирования природных пожаров Университета Джорджа Мейсона (СПП-УДМ) позволила спрогнозировать значительный рост суммарного осаждения азота по сравнению с пороговыми значениями критической нагрузки в Калифорнии в связи с сезоном беспрецедентных природных пожаров в 2020 году в Соединенных Штатах Америки. Критическая нагрузка — это уровень осаждения, в результате превышения которого может наноситься ущерб экосистемам. В исследовании Campbell et al. (2022) утверждается, что горение биомассы привело к резкому увеличению суммарного осаждения азота на основные типы естественной растительности в Калифорнии, причем за период с августа по октябрь 2020 года относительный рост осаждения азота в среднем составил ~78 % (с 7,1 до 12,6 кг·га⁻¹/год). В свою очередь, рост осаждения азота в смешанных лесах оказался еще выше (~173 %, с 6,2 до 16,9 кг·га⁻¹/год). Уровень осаждения азота, вызванного горением биомассы, в ~6–12 раз превысил нижние пороговые значения критической нагрузки, установленные для основных типов естественной растительности (например, для лесов, в случае которых этот показатель составляет 1,5–3 кг·га⁻¹/год) (рисунок 9). Высокий уровень осаждения азота в долине Сан-Хоакин и в районе Лос-Анджелеса, наблюдаемый при моделировании «в отсутствие пожаров (NOF)», связан с повсеместным увеличением выбросов сельскохозяйственного и транспортного секторов соответственно. В данных регионах, как правило, отмечается высокий уровень осаждения азота как на активной стадии пожара, так и на стадии затухания; однако пороговые значения критической нагрузки для разных типов экосистем в этих регионах могут отличаться.

Другое исследование (Kopplitz et al. (2021)), посвященное осаждению азота в результате горения биомассы в Соединенных Штатах Америки, показало, что в 2008–2012 годах пожары могли повлечь за собой до 30 % общего осаждения азота в северо-западных районах страны. Осаждение происходило на площади > 4 млн га, при этом его объем находился на уровне, при котором наносится ущерб окружающей среде (> 0,5 кг·га⁻¹/год). Экологическое моделирование роста деревьев позволило спрогнозировать целый диапазон реакций, начиная от положительного фертилизационного эффекта и заканчивая характерными для отдельных видов отрицательными реакциями с точки зрения выживаемости и роста.

В ближайшие десятилетия на возникновение природных пожаров могут повлиять несколько прогнозируемых тенденций в области изменения климата, включая глобальное повышение температуры и региональное увеличение частоты и интенсивности волн тепла и засух (IPCC, 2014). В настоящее время складывается консенсус относительно того, что эти тенденции с большой вероятностью приведут к увеличению частоты и росту степени воздействия природных пожаров во многих регионах мира (IPCC, 2022; Smith et al., 2020; Baker, 2022) и могут привести к серьезному увеличению осаждения азота

в подветренном направлении и усугубить связанные с этим последствия. Для более глубокого понимания роли пожара в осаждении азота и обусловленного этим воздействия на экосистемы и последствий необходима совместная работа по наблюдению и моделированию.

Взаимосвязь сельского хозяйства и качества воздуха

Фрэнк Дентенер, Джина Миллс, Катрина Шарпс, Арлиндо да Силва, Уорд Смит, Мэтью Хорт

Интенсификация сельского хозяйства влияет на окружающую среду разными путями: увеличивается поступление питательных и химических веществ в почву, водосборные бассейны и океаны, а также увеличиваются выбросы парниковых газов и загрязняющих веществ в атмосферу. С другой стороны, загрязнение воздуха может повлиять на выращивание сельскохозяйственных культур и производство продовольствия. Два доклада ВМО, посвященные озону и твердым частицам, проливают свет на разнообразные формы взаимодействия между зерновыми культурами, метеорологическими процессами и загрязнением воздуха, а также на необходимость создания комплексной инфраструктуры для наблюдений и моделирования (WMO, в печати a, в печати b).

Концентрация озона находится на высоком уровне во многих важнейших сельскохозяйственных регионах мира. Озон может снижать как количество, так и качество урожая основных продовольственных культур (рисунок 10). Механизмы, в соответствии с которыми наносится озоновый ущерб, относительно хорошо изучены, и для ряда сельскохозяйственных культур разработаны надежные показатели воздействия (Mills et al., 2017). В целом по миру потери урожая, обусловленные воздействием озона, составляют в среднем 4,4–12,4 % для основных продовольственных культур, при этом потери пшеницы и сои в ключевых сельскохозяйственных районах Индии и Китая достигают 15–30 % (рисунок 10). Хотя в последние десятилетия благодаря ограничению выбросов удалось снизить загрязнение озоном в Северной Америке и Европе, но в странах с развивающейся экономикой концентрация озона все еще растет (Szora et al., 2021), и этот рост продолжится, если не принять решительных мер по снижению выбросов. В ближайшие десятилетия ожидаемый рост концентрации метана в атмосфере приведет к повышенному образованию озона. Усовершенствование методов кормления скота, уборки, хранения и использования навоза, а также практики земледелия позволило бы существенно сократить глобальные выбросы метана и таким образом повысить урожайность.

Сельскохозяйственная деятельность приводит к существенному количеству выбросов и образованию твердых частиц. Хранение и использование стойлового навоза и применение минеральных удобрений может приводить к образованию твердых частиц нитрата аммония. Расчистка земель и сжигание растительных

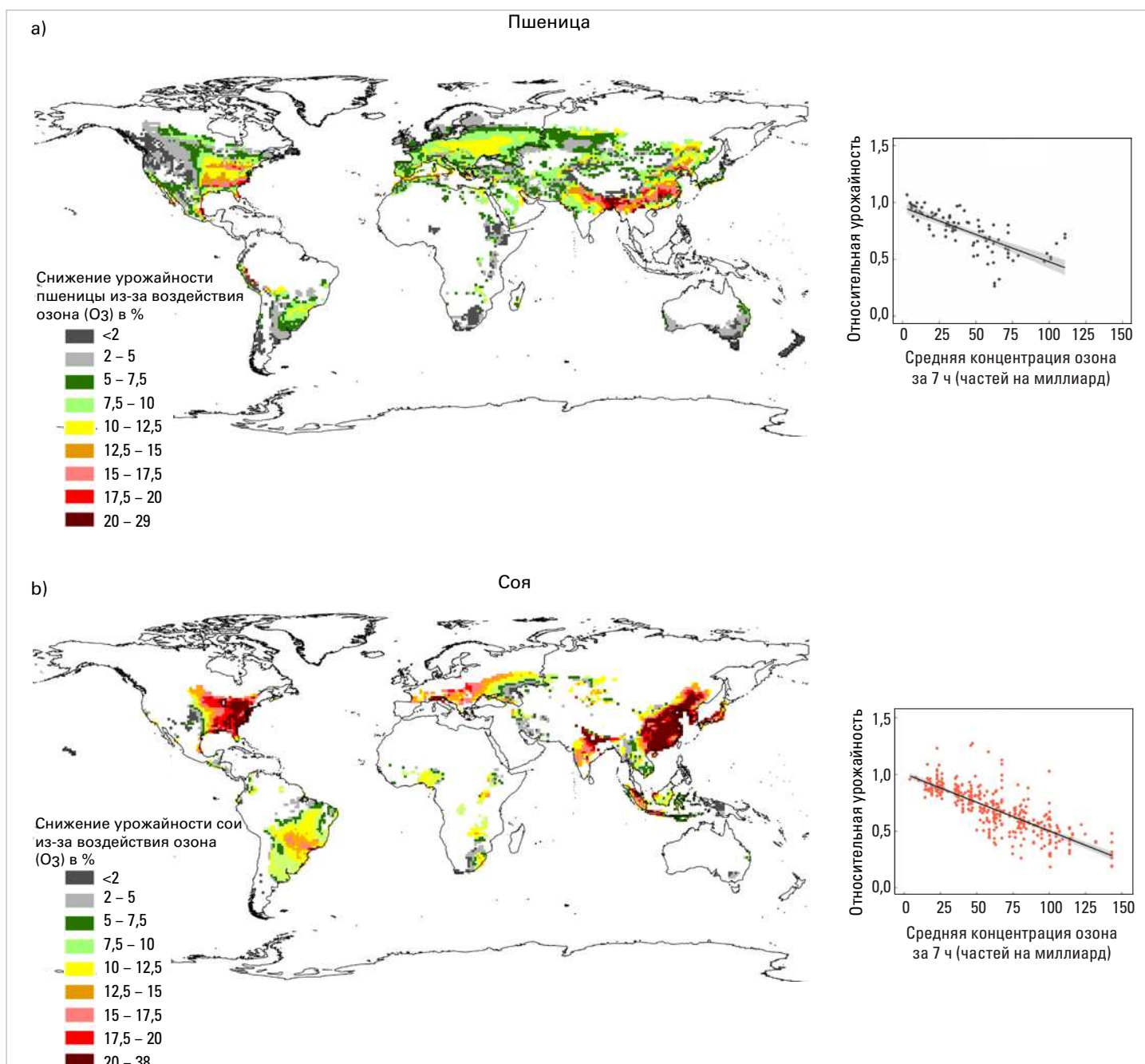


Рисунок 10. Снижение урожайности (в %) пшеницы (верхняя карта) и сои (нижняя карта) из-за воздействия озона в 2010–2012 годах. На диаграммах рассеяния показано снижение урожайности пшеницы (вверху) и сои (внизу) в зависимости от средней концентрации озона, измеряемой за 7-часовой период (в частях на миллиард, среднее значение за 90 дней, представляющее основной вегетационный период для каждой сельскохозяйственной культуры). Данные были объединены на основе результатов экспериментов с 18 сортами пшеницы и 52 сортами сои, проведенных в Азии, Северной Америке и Европе.

Источник: Mills et al., 2018

остатков приводят к чрезвычайно высокому уровню загрязненности твердыми частицами в подветренном направлении. В регионах, где наблюдаются высокие концентрации аэрозолей, твердые частицы могут воздействовать на функционирование устьиц и метаболические процессы растений. Кроме того, воздействуя на приземную температуру воздуха, а также на режим распределения и количество осадков, твердые частицы приводят к изменениям в солнечном излучении, поглощаемом растениями. В имеющихся исследованиях приводится оценка как положительного, так и отрицательного воздействия твердых частиц на урожайность сельскохозяйственных культур, однако

достоверных оценок комплексного воздействия на растениеводство пока не существует. С точки зрения охраны здоровья, необходимо в срочном порядке снизить уровень загрязнения атмосферы твердыми частицами, от которого ежегодно умирает 4,14 млн человек (Fuller et al., 2022), однако пока не известно, как от этого выиграет или пострадает растениеводство.

Разнообразные связи между качеством воздуха и сельским хозяйством заслуживают большего внимания со стороны как ученых, так и лиц, ответственных за принятие решений. В связи с перспективой усиления волн тепла, вызванных изменением

климата, и ростом спроса на продовольствие и корма понимание этих связей станет еще более важным. Для того чтобы оценить воздействие загрязнения на сельскохозяйственное производство и способствовать реализации научно обоснованных мер по улучшению качества воздуха и снижению потерь в сельскохозяйственном производстве, необходим комплексный междисциплинарный подход, подразумевающий мониторинг в сельскохозяйственных районах, проведение экспериментов в области воздействия загрязняющих веществ на сельскохозяйственные культуры, моделирование и анализ.

Метеорология и атмосферные потоки городских лесных насаждений: последствия для качества воздуха и климата

Полари Батиста Корреа, Джулиано Мазелли Локоселли, Нозли Франки Лионарду, Марио Гавидия-Кальдерон, Эдмилсон Диас де Фрейтас, Мария де Фатима Андраде, К. Хайнке Шлюнцен, Ранджит С. Сохи

Городские районы часто состоят из зданий и объектов инфраструктуры высотой 100 м и более, оказывающих влияние на розу ветров и температурный режим. Для того чтобы понять процесс рассеяния тепла и смешивания атмосферных газов в городе, часто изучают так называемый слой полога, расположенный на высоте ~1,5 м над уровнем земли, и сравнивают его с аналогичным слоем полога в близлежащих сельских районах. Как правило, в ночное время температура воздуха в слое полога в городских районах выше аналогичного показателя в близлежащих сельских районах. Это явление обычно называют городским островом тепла (ГОТ). Разница в температурах зависит от многих факторов, но может достигать 9 °C. В сочетании с изменением климата это явление влечет за собой множество последствий, включая дополнительный тепловой стресс в ночное время, влияние на высоту атмосферного пограничного слоя, и, в свою очередь, на химический состав атмосферы, а также изменения в росте растений и сезоне опыления, что может отрицательно сказываться на состоянии окружающей среды и здоровье человека.

В новом руководстве BMO *Guidance on Measuring, Modelling and Monitoring the Canopy Layer Urban Heat Island (CL-UHI)* (Руководство по измерению, моделированию и мониторингу городского острова тепла под слоем полога (ГОТ-СП) (WMO-No. 1292)) изложены научные основы эволюции ГОТ-СП, а также даны обширные рекомендации по его определению с помощью измерений и моделирования. Осуществление мониторинга ГОТ-СП — это важная задача, поскольку значительная часть населения живет и/или работает в городах, а воздействие высоких температур может приводить к росту заболеваемости и смертности, особенно во время волн тепла и в ночное время. Примеры рекомендаций, приведенных в руководстве, касаются не только целевых измерений температуры

и ветра, но и потоков, или движения, тепла и газов вверх и вниз в черте города. В следующих пунктах кратко изложены результаты исследования, которое было проведено в Сан-Паулу, Бразилия, призванного показать, как такие измерения температуры и потоков позволяют получить ценную информацию.

В состав столичного региона Сан-Паулу (RMSP) входят 39 муниципалитетов с населением более 22 миллионов человек. Сан-Паулу расположен в регионе, который характеризуется сложным ландшафтом и испытывает влияние морского бриза, и является уникальным местом для изучения температур и ГОТ в городской среде. Учитывая быстрый рост городов в тропиках, крайне важно признать возможные последствия эффекта ГОТ в этих регионах.

По мере развития исследований городского слоя полага все больше внимания уделяют роли растительности как природосберегающего инструмента, помогающего решить проблему островов тепла и выбросов CO₂ и смягчить воздействие городов, являющихся источниками парниковых газов. Растительность играет ключевую роль в уменьшении воздействия ГОТ, при этом используются различные механизмы. Например, растительность может снижать приземную температуру, обеспечивая тень, перехватывая солнечное излучение и способствуя охлаждению при испарении, что приводит к снижению локальной интенсивности ГОТ. Ввиду того, что мониторинг потоков и концентрации CO₂ в городах по всему миру имеет важное значение, производятся измерения в двух покрытых растительностью районах Сан-Паулу: в городском парке «Ибирапуэра» (далее «Ибира») площадью 1,58 км² и парке «Ипиранга» (далее «ПЕФИ») площадью 4,76 км². «ПЕФИ» — это участок Атлантического леса, расположенный в пределах городской агломерации Сан-Паулу, где сохранились несколько родников и ручьев, а также высокий уровень биоразнообразия, в том числе виды, находящиеся под угрозой исчезновения. «Ибира», в свою очередь, включает в себя ряд ряд зеленых насаждений и объектов благоустройства, таких как велосипедная дорожка, 13 спортивных площадок с освещением, беговые дорожки, променады, зоны отдыха и открытые концертные площадки. Кроме того, в парке располагаются общественные здания и музеи.

На рисунке 11 представлено пространственное распределение приземных температур в Сан-Паулу в первые часы пополудни. Приземная температура, представленная на рисунке, была получена на основе данных со спутника Landsat 8. На рисунке отчетливо видно, что температуры в городе выше по сравнению с температурами в близлежащих районах. При этом можно наблюдать существенные различия в температурах в пределах черты города.

Для исследований качества воздуха и последствий изменения климата крайне важное значение имеют измерения потоков, позволяющие понять физико-химические процессы с участием химических

веществ, такие как выброс и поглощение углерода, и оценить кадастры выбросов. Разнообразные зеленые насаждения способствуют улучшению климатического баланса и качества воздуха. Согласно рисунку 12 а), на котором представлены почасовые наблюдения за январь 2023 года, положительный поток CO_2 находится под прямым влиянием антропогенных процессов, происходящих в данном месте в данное время суток (например, таких как движение транспорта, в результате которого в атмосферу выбрасывается CO_2), в то время как отрицательный поток CO_2 связан с поглощением выбросов растительностью. Различия между парками напрямую связаны с их размерами, различным характером землепользования, высотой, на которой проводились измерения, а также степенью сомкнутости полога.

На рисунке 12 б) показано сравнение температуры воздуха, которая измерялась с ноября 2022 года по конец апреля 2023 года в обоих парках («ПЕФИ» и «Ибира»), с данными, полученными на одной из станций наблюдения за качеством воздуха, которая входит в сеть «Экологическая компания штата Сан-Паулу» (CETESB) в одном из урбанизированных районов города. Температура в «ПЕФИ» выше, чем в «Ибире», из-за более густой растительности, которая обуславливает разницу в теплоемкости. Наибольшая разница между ними наблюдается ранним утром (между 05:00 и 07:00 по местному времени) и в первые часы пополудни (между 13:00 и 16:00 по местному времени). В «Ибире» по сравнению с «ПЕФИ» измерения производят на больших высотах. Тем не менее оба парка, по сравнению с близлежащими районами, считаются островами холода в границах Сан-Паулу. Эти островки зелени крайне важны для благосостояния местного населения, поскольку они не только охлаждают воздух, но и предоставляют различные экосистемные услуги, в том числе поглощение атмосферного углерода.

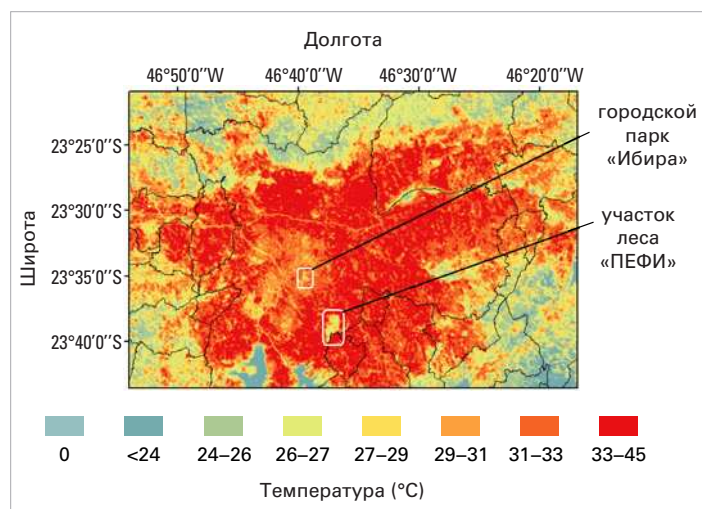


Рисунок 11. Приземная температура (°C) в столичном регионе Сан-Паулу 23 сентября 2015 года в 13:04 по местному времени
 Источник: Институт астрономии, геофизики и наук об атмосфере, Университет Сан-Паулу

Заключение

В третьем издании *Бюллетеня ВМО по качеству воздуха и климату* рассматриваются различные пути воздействия волн тепла на качество воздуха, а также приводятся примеры за 2022 год. Хотя по сравнению с предыдущими годами количество крупных пожаров и пустынных пыльных бурь в целом снизилось, тем не менее многочисленные локальные очаги возгорания и бури такого рода все же имели место, что приводило к воздействию большого количества аэрозолей или твердых частиц на густонаселенные районы. Волны тепла, повлекшие за собой пожары в западной части Соединенных Штатов Америки, а также волны тепла, сопровождаемые вторжением пустынной пыли в Европу, привели к повышению уровня воздействия твердых частиц до опасных значений. Такие высокие

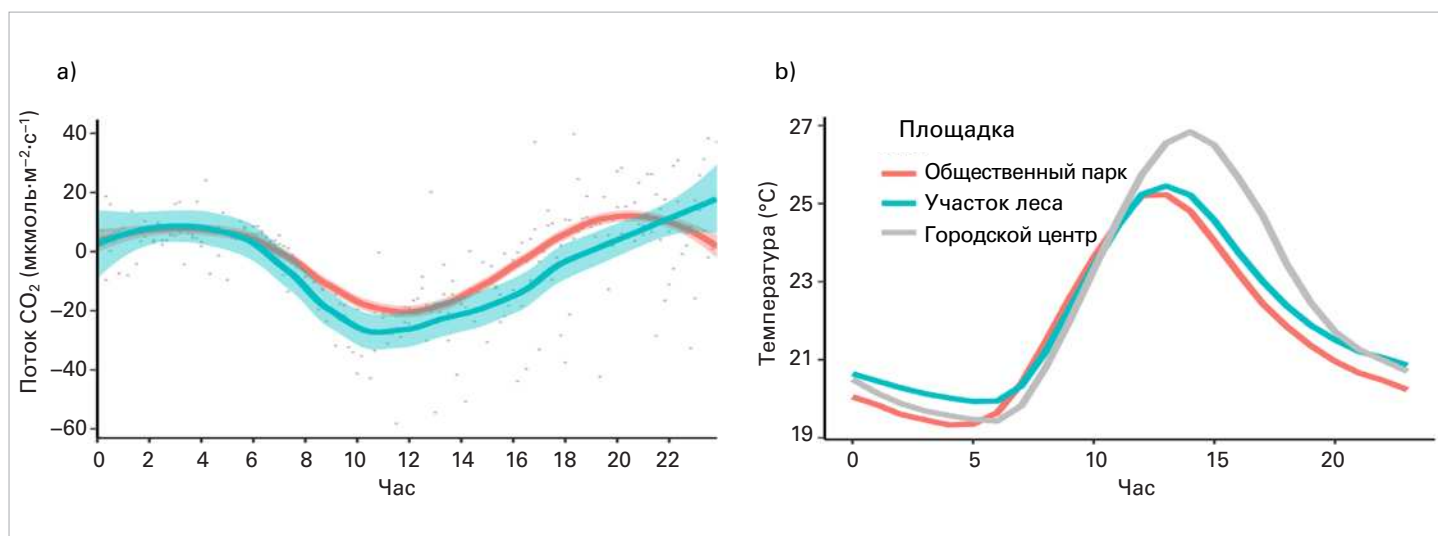


Рисунок 12. а) Сравнение потока углерода и б) температуры в парке «Ибира» (розовый) и в парке «ПЕФИ» (зеленый). На графике а) значения потока выше нуля указывают на выброс CO_2 , в то время как значения ниже нуля указывают на поглощение CO_2 . На графике б) также отображена температура, измеренная в центре Сан-Паулу (серый).

Источник: Центр по использованию ядерной энергии в сельском хозяйстве, Университет Сан-Паулу

температуры и концентрации твердых частиц, как те, что наблюдались во время этих двух совершенно разных явлений в 2022 году, могут представлять существенную угрозу здоровью, особенно для уязвимых групп населения.

Волны тепла также оказывают влияние на химические реакции в газовой фазе, что чаще всего приводит к увеличению концентрации озона, который наряду с твердыми частицами является еще одним основным загрязнителем атмосферы, вызывающим беспокойство. Это можно было наблюдать во время волны тепла, охватившей почти всю Европу в июле 2022 года. Во время этой волны тепла, по мере того как она в течение 10 дней перемещалась по континенту, практически одновременно наблюдались температурные аномалии и превышение установленных ВОЗ безопасных пороговых значений концентрации озона в атмосфере. Основные химические реакции и выбросы соединений, определяющие концентрацию озона, хорошо изучены, поэтому меры по сдерживанию выбросов и уменьшению воздействия загрязнителей атмосферы на население приносят наибольшую пользу именно во время волн тепла.

Кроме того, было проанализировано вызываемое пожарами атмосферное осаждение азотсодержащих соединений в подветренном направлении и его влияние на экосистемы — явление, характер которого из-за потепления климата и волн тепла будет усиливаться. До сих пор осаждение азота, причиной которого являются пожары, было изучено слабо; тем не менее благодаря двум новым основанным на моделях исследованиям оно было определено в количественном выражении для некоторых регионов Соединенных Штатов Америки. Было установлено, что в Калифорнии и на северо-западе Соединенных Штатов Америки пожары приводят к существенному осаждению азота в некоторых природных экосистемах, при этом во многих случаях из-за возникающих в результате этого выбросов, приводящих к дальнейшему загрязнению атмосферы, отмечается превышение пороговых значений критической нагрузки и отрицательное воздействие на биоразнообразие, чистую питьевую воду и даже качество воздуха.

В настоящем Бюллетене кратко изложены два доклада ВМО, в которых подробно анализируется взаимосвязь между сельским хозяйством и качеством воздуха. Два основных вещества, загрязняющих атмосферу, — озон и твердые частицы, — выполняют сложные функции: оба загрязнителя воздействуют на сельское хозяйство и, в свою очередь, испытывают его воздействие на себе. В то время как озон считается вредным веществом для сельскохозяйственных культур, воздействие твердых частиц на растения не является однозначным, поскольку они оказывают влияние на солнечное излучение, температуры, атмосферные осадки и процессы роста, что может приносить как пользу, так

и вред. Потери урожая из-за озона были определены в количественном выражении на глобальном уровне, при этом в настоящем Бюллетене были приведены примеры пшеницы и сои. Тем не менее суммарное воздействие твердых частиц на сельскохозяйственные культуры остается неизвестным, что подчеркивает важность проведения дальнейших наблюдений и исследований для понимания того, как меры в отношении качества воздуха будут влиять на производство продовольствия и наоборот.

Наконец в заключительной части настоящего Бюллетеня приводится общая информация о том, как городская среда влияет на качество воздуха и климат. В новом руководстве ВМО *Guidance on Measuring, Modelling and Monitoring the Canopy Layer Urban Heat Island (CLUHI)* (Руководство по измерению, моделированию и мониторингу городского острова тепла под слоем полога (ГОТ-СП)) (WMO-№. 1292) приводится анализ имеющихся в настоящее время знаний в этой области, а также рассматривается необходимость более качественной оценки городского острова тепла под слоем полога и контраста температур между городскими и сельскими районами, измеряемых чуть выше поверхности Земли (~1,5 м), где на здоровье человека оказывается самое прямое воздействие. Недавно в Сан-Паулу, Бразилия, были получены результаты упоминаемых в руководстве наблюдений: измерения температур и выбросов CO₂ в двух парках показали, что благодаря интеграции в городскую среду большего количества зеленых насаждений интенсивность явления городского острова тепла снижается, а последствия выбросов CO₂ частично смягчаются, что указывает на преимущества природосберегающего решения в борьбе с изменением климата.

Ссылки

- Andreae, M. O. Emission of Trace Gases and Aerosols from Biomass Burning – An Updated Assessment. *Atmospheric Chemistry and Physics* **2019**, *19*, 8523–8546. <https://doi.org/10.5194/acp-19-8523-2019>.
- Baker, S. J. Fossil Evidence that Increased Wildfire Activity Occurs in Tandem with Periods of Global Warming in Earth's Past. *Earth-Science Reviews* **2022**, *224*. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103871>.
- Bray, C. D.; Battye, W. H.; Aneja, V. P. et al. Global Emissions of NH₃, NO_x, and N₂O from Biomass Burning and the Impact of Climate Change. *Journal of the Air & Waste Management Association* **2021**, *71* (1), 102–114. <https://doi.org/10.1080/10962247.2020.1842822>.
- Campbell, P. C.; Tong, D.; Saylor, R. et al. Pronounced Increases in Nitrogen Emissions and Deposition Due to the Historic 2020 Wildfires in the Western U.S. *Science of the Total Environment* **2022**, *839*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156130>.

- Di Tomaso, E.; Escribano, J.; Basart, S. et al. The MONARCH High-resolution Reanalysis of Desert Dust Aerosol over Northern Africa, the Middle East and Europe (2007–2016). *Earth System Science Data* **2022**, *14*, 2785–2816. <https://doi.org/10.5194/essd-14-2785-2022>.
- Fuller, R.; Landrigan, P. J.; Balakrishnan, K. et al. Pollution and Health: A Progress Update. *The Lancet Planetary Health* **2022**, *6*, e535–e547. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(22\)00090-0](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(22)00090-0).
- Goodridge, B. M.; Hanan, E. J.; Aguilera, R. et al. Retention of Nitrogen Following Wildfire in a Chaparral Ecosystem. *Ecosystems* **2018**, *21*, 1608–1622. <https://doi.org/10.1007/s10021-018-0243-3>.
- Gouldsbrough, L.; Hossaini, R.; Eastoe, E. et al. A Temperature Dependent Extreme Value Analysis of UK Surface Ozone, 1980–2019. *Atmospheric Environment* **2022**, *273*. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.118975>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Core Writing Team; Pachauri, R. K.; Meyer, L. A., Eds; IPCC: Geneva, 2014. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_ru.pdf.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change and Land: An IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems*; Masson-Delmotte, V.; Zhai, P.; Pörtner, H.-O., Eds.; Cambridge University Press, 2022. <https://doi.org/10.1017/9781009157988>.
- Kopplitz, S. N.; Nolte, C. G.; Sabo, R. D. et al. The Contribution of Wildland Fire Emissions to Deposition in the US: Implications for Tree Growth and Survival in the Northwest. *Environmental Research Letters* **2021**, *16*. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abd26e>.
- Mills, G.; Harmens, H.; Hayes, F. et al. *Chapter III – Mapping Critical Levels for Vegetation*. ICP Vegetation Programme Coordination Centre, Centre for Ecology and Hydrology: United Kingdom, 2017. <https://icpvegetation.ceh.ac.uk/chapter-3-mapping-critical-levels-vegetation>.
- Mills, G.; Sharps, K.; Simpson, D. et al. Closing the Global Ozone Yield Gap: Quantification and Co-benefits for Multistress Tolerance. *Global Change Biology* **2018**, *24* (10), 4869–4893. <https://doi.org/10.1111/gcb.14381>.
- National Institute of Environmental Health Sciences (NIEHS). *Temperature-related Death and Illness*. 2022. https://www.niehs.nih.gov/research/programs/climatechange/health_impacts/heat/index.cfm.
- Olson, D. M.; Dinerstein, E.; Wikramanayake, E. D. et al. Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth: A New Global Map of Terrestrial Ecoregions Provides an Innovative Tool for Conserving Biodiversity. *BioScience* **2004**, *51*, 933–938. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2001\)051\[0933:TEOTWA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051[0933:TEOTWA]2.0.CO;2).
- Pusede, S. E.; Steiner, A. L.; Cohen, R. C. Temperature and Recent Trends in the Chemistry of Continental Surface Ozone. *Chemical Reviews* **2015**, *115* (10), 3898–3918. <https://doi.org/10.1021/cr5006815>.
- Smith, A. J. P.; Jones, M. W.; Abatzoglou, J. T. et al. Climate Change Increases the Risk of Wildfires. In *Critical Issues in Climate Change Science*. Le Quéré, C.; Liss, P.; Forster, P., Eds.; Science Brief Review: September 2020 Update. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4570195>.
- 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*. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106818>.
- Szopa, S.; Naik, V.; Adhikary, B. et al. Short-Lived Climate Forcers. In *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, UK and New York, USA, 2021. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-6/>.
- van Wees, D.; van der Werf, G. R.; Randerson, J. T. et al. Global Biomass Burning Fuel Consumption and Emissions at 500 m Spatial Resolution Based on the Global Fire Emissions Database (GFED). *Geoscientific Model Development* **2022**, *15*, 8411–8437. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-8411-2022>.
- 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 Air Quality and Climate Bulletin, No. 2*; WMO: Geneva, 2022.
- World Meteorological Organization (WMO). *Guidance on Measuring, Modelling and Monitoring the Canopy Layer Urban Heat Island (CL-UHI)* (WMO-No. 1292). Geneva, 2023.
- World Meteorological Organization (WMO). *The Impacts of Tropospheric Ozone Pollution on Crop Yield: Mechanisms, Quantification and Options for Mitigation*; WMO: Geneva, in press-a.
- World Meteorological Organization (WMO). *The Impacts of Particulate Matter on Crop Yield: Mechanisms, Quantification and Options for Mitigation*; WMO: Geneva, in press-b.
- World Wide Fund for Nature (WWF); Boston Consulting Group (BCG). *Fires, Forests and the Future: A Crisis Raging out of Control?*; 2020. https://wwf.eu.awsassets.panda.org/downloads/wwf_fires_forests_and_the_future_report.pdf.

Выражение признательности и ссылки

Джеймс Ли и Уилл Драйсдейл (соавторы) получили поддержку Национального центра наук об атмосфере Соединенного Королевства.

Оуэн Р. Купер (Редакционный совет) получил поддержку в рамках соглашения о сотрудничестве Национального управления по исследованию океанов и атмосферы (НОАА), NA22OAR4320151.

Выражается благодарность доктору Михаэлю Мютиленайосу за помощь в подготовке рисунков 5 b) и c).

Данные, связанные с покрытыми растительностью районами в столичном регионе Сан-Паулу, были получены благодаря двум проектам, финансируемым Фондом научных исследований штата Сан-Паулу (FAPESP): METROCLIMA (2016/18438-0) и Functional Forests (2019/08783-0).

Результаты реанализа MERRA-2 были получены Управлением глобального моделирования и ассимиляции (УГМА) НАСА с использованием высокопроизводительных вычислительных ресурсов НАСА, предоставляемых Центром моделирования климата НАСА (ЦМКН) в Центре космических полетов НАСА им. Годдарда. Продукция MERRA-2 находится в свободном доступе на сайте <https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets?project=MERRA-2>.

Данные АОС США доступны на сайте <https://files.airnowtech.org/?prefix=airnow/2022/20220912/>.

Предоставление информационного продукта ACTRIS Level 3 осуществлялось при поддержке Программы Европейского союза «Горизонт-2020» в соответствии с соглашениями о грантах № 654109 и 871115.

Мнения, выраженные в настоящем Бюллетене, принадлежат авторам и не обязательно отражают точку зрения или политику организаций, с которыми они связаны.

Редакционный совет

Председатель: доктор Джули М. Найсли (член Научного руководящего комитета ГСА ВМО по проблемам загрязнения окружающей среды и химии атмосферы), Университет Мэриленда, США, и НАСА, США

Члены: Грег Кармайл (председатель Научного руководящего комитета ГСА ВМО по проблемам загрязнения окружающей среды и химии атмосферы), Университет Айовы, США;

Питер Коларко (член Научно-консультативной группы ГСА ВМО по аэрозолям), Лаборатория химии и динамики атмосферы, Центр космических полетов НАСА им. Годдарда, Гринбелт, США;

Оуэн Р. Купер (председатель Научно-консультативной группы ГСА ВМО по химически активным газам), Объединенный институт исследований в области наук об окружающей среде (СИРЕС), Университет Колорадо в Боулдере и Лаборатория химических наук НУОА (ЛХН), США;

Фрэнк Дентенер (сопредседатель Научно-консультативной группы ГСА ВМО по применениям, член Инициативы ГСА ВМО по объединению данных измерений и результатов моделирования для оценки глобального суммарного атмосферного осаднения), Объединенный научно-исследовательский центр (ОИЦ) Европейской комиссии, Институт окружающей среды и устойчивости, Испра, Италия;

Лючия Мона (член Научно-консультативной группы ГСА ВМО по аэрозолям), Институт методологии анализа окружающей среды, Национальный совет Италии по научным исследованиям (CNR), Потенца, Италия;

Венсан-Анри Пёш (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);

Ранджит С. Сохи (председатель Научно-консультативной группы ГСА ВМО по городским исследованиям, метеорологии и окружающей среде), Университет Хартфордшира, Соединенное Королевство;

Джон Уокер (сопредседатель Научно-консультативной группы ГСА ВМО по суммарному атмосферному осаднению), Агентство по охране окружающей среды Соединенных Штатов Америки, Дарем, США.

Все авторы

Мария де Фатима Андраде, Институт астрономии, геофизики и наук об атмосфере (ИАГ), Университет Сан-Паулу (УСП), Бразилия; Полари Батиста Корреа, Отдел по изучению функционирования тропических экосистем, Центр по использованию ядерной энергии в сельском хозяйстве (СЕНА), УСП, Бразилия; Патрик Кэмпбелл, Университет Джорджа Мейсона, Центр науки и систем пространственной информации, а также НУОА, Лаборатория ресурсов атмосферы (ЛРА), США; Питер Коларко, Лаборатория химии и динамики атмосферы, Центр космических полетов НАСА им. Годдарда, США; Арлиндо да Силва, Центр космических полетов НАСА им. Годдарда, Управление глобального моделирования и ассимиляции (УГМА), США; Фрэнк Дентенер, Объединенный научно-исследовательский центр Европейской комиссии, Испра, Италия; Уилл Драйсдейл, Йоркский университет, Соединенное Королевство; Йоханнес Флемминг, ЕЦСПП, Рединг, Соединенное Королевство, и Бонн, Германия; Нозли Франки Лионарду, ИАГ, УСП, Бразилия; Эдмилсон Диас де Фрейтас, ИАГ, УСП, Бразилия; Марио

Гавидия-Кальдерон, ИАГ, УСП, Бразилия; Уорд Смит, Метеорологическая служба Соединенного Королевства; Джеймс Ли, Йоркский университет, Соединенное Королевство; Джулиано Мазелли Локосселли, Отдел по изучению функционирования тропических экосистем, CENA, УСП, Бразилия; Джина Миллс, Центр по экологии и гидрологии Соединенного Королевства (ЦЭГ СК), Центр по вопросам окружающей среды Уэльса (ECW), Соединенное Королевство, и факультет биологических наук и наук об окружающей среде, Гётеборгский университет, Швеция; Лючия Мона, Институт методологии анализа окружающей среды, Национальный совет по научным исследованиям, Италия; Бет Нельсон, Йоркский университет, Соединенное Королевство; Джули Найсли, Университет Мэриленда,

США, и Центр космических полетов НАСА им. Годдарда, США; Венсан-Анри Пёш, ЕЦСПП, Рединг, Соединенное Королевство, и Бонн, Германия; Рик Сейлор, НУОА, ЛРА, США; К. Хайнке Шлюнцен, Метеорологический институт, Гамбургский университет, Германия; Джереми Шрёдер, АООС США, Управление исследований и разработок, США; Катрина Шарпс, ЦЭГ СК, ECW, Соединенное Королевство; Уорд Смит, Оттавский научно-исследовательский центр, Министерство сельского хозяйства и продовольствия Канады, Канада; Ранджит С. Сохи, Центр исследований изменения климата (C3R), Университет Хартфордшира, Соединенное Королевство; Джон Уокер, АООС США, Управление исследований и разработок, США; Сэм Уилсон, Йоркский университет, Соединенное Королевство.

Контактная информация

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>