



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 изменения климата тесно взаимосвязаны, а некоторые загрязнители воздействуют на изменение климата. Например, короткоживущие химически активные газы, такие как озон и его прекурсоры, являются как общими загрязнителями воздуха, так и парниковыми газами, которые нагревают атмосферу. Изменение климата также влияет на загрязнение: повышение температуры, изменение ветров, увеличение количества лесных пожаров на новых местах и новые режимы осадков воздействуют на образование, продолжительность и рассеивание загрязнения воздуха. Качество воздуха также влияет на климат посредством обеспечения здоровья экосистемы. Азот, сера и озон в результате атмосферного осаждения (процесс, при котором загрязнители воздуха из атмосферы оседают на поверхности Земли) могут отрицательно сказываться на услугах, предоставляемых природными экосистемами, таких как чистая вода, обеспечение биоразнообразия и хранение углерода, а также могут влиять на урожайность в сельскохозяйственных системах.

Многие источники загрязнения воздуха и изменения климата одинаковы. Например, при сжигании ископаемых видов топлива (одного из основных источников диоксида углерода (CO_2)) происходит образование органического и неорганического аэрозоля, а также в атмосферу выбрасываются оксиды азота (NO_x), 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 неорганический аэрозоль аммония.

Вопросы качества воздуха и климата также все чаще включаются в систему управления. В Шестом оценочном докладе, выпущенном Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК) в 2021 году, дана систематическая оценка неблагоприятных последствий изменения климата для здоровья. В 2023 году вопросы здравоохранения впервые были включены в официальную повестку дня двадцать восьмой Конференции Сторон Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата (КС 28). Принимающая страна и Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) выпустили *Декларацию по климату и здоровью*, подписанную более чем 130 странами, приоритетное внимание в которой уделяется здоровью в контексте действий в области климата и продвижению стойких к последствиям изменения климата, устойчивых и справедливых систем здравоохранения. В рамках ВМО в 2023 году была учреждена Рабочая группа по вопросам взаимосвязи между качеством воздуха, изменением климата и воздействием на здоровье (РГ ВКЗ) программы Глобальной службы атмосферы (ГСА) ВМО. Она оказывает поддержку Совместному бюро ВОЗ-ВМО по климату и здоровью и помогает группам Департамента науки и инноваций ВМО в совместной работе по проектированию продукции и обслуживания для улучшения здоровья населения.

В четвертом ежегодном *Бюллетене ВМО по качеству воздуха и климату* публикуется информация о качестве воздуха и его связи с изменением климата, учитывающая тренды и географическое распределение загрязнения. В отношении состояния воздуха в Бюллетене 2024 года i) расширено резюме состояния качества воздуха в 2023 году за счет включения оценок из двух источников (Службы мониторинга атмосферы в рамках программы «Коперник» (СМАК) и Управления глобального моделирования и ассимиляции (УГМА) Национального управления по авиации и исследованию космического пространства (НАСА)) и ii) приведена статья о концентрациях биоаэрозолей. В отношении изменения климата в Бюллетене 2024 года рассматриваются воздействия канадских и чилийских лесных пожаров на загрязнение окружающей среды, а также содержится материал об образовании наночастиц, которые, в свою очередь, могут повлиять на потепление в ближайшем

будущем. В отношении воздействий в настоящем Бюллетене опубликована статья о последствиях, которые будет иметь загрязнение твердыми частицами для сельского хозяйства.

Круг тем, освещенных в Бюллетене 2024 года, представляет некоторые научные разработки, которые ГСА стремится стимулировать в рамках своих стратегических целей для развития программ и конвенций. Надежный, регулярный мониторинг и отчетность содействуют повышению подотчетности и помогают отслеживать ход осуществления. Информация об источниках загрязнения помогает определить приоритетность мер по смягчению последствий изменения климата и загрязнения воздуха, а также выявляет некоторые взаимосвязи между изменением климата и загрязнением окружающей среды. Данные о воздействиях — в данном случае о влиянии загрязнения твердыми частицами на урожайность сельскохозяйственных культур — указывают на область, вызывающую озабоченность. Анализ связей между загрязнением воздуха и климатом, как в материалах о биоаэрозолях и сдвигах в нуклеации и облачных явлениях, помогает мотивировать и направлять комплексные действия по борьбе с загрязнением и изменением климата.

Данные о глобальной концентрации твердых частиц в 2023 году, полученные на основе двух видов продукции

Йоханнес Флемминг, Алли Коллоу

Твердые частицы (PM) на поверхности, диаметр которых составляет менее 2,5 микрометров, называются $PM_{2.5}$. $PM_{2.5}$ в атмосфере представляют серьезную опасность для здоровья (Всемирная организация здравоохранения, 2021 г.). На глобальном уровне антропогенная деятельность и природные источники вносят вклад в загрязнение частицами $PM_{2.5}$ в различных пропорциях. Выбросы $PM_{2.5}$ происходят в результате деятельности человека, в том числе в области транспорта, промышленности и сельского хозяйства, а также в результате действия природных факторов, таких как лесные пожары и разносимая ветром пустынная пыль. Образование вторичных аэрозольных частиц из таких

газов, как диоксид серы, оксиды азота, аммоний и летучие органические соединения, является важным дополнительным источником $PM_{2.5}$. Такое разнообразие источников выбросов и неопределенность в процессах образования и других процессах делают предсказание (прогнозирование) $PM_{2.5}$ сложной задачей.

Оптимальные оценки глобальных концентраций $PM_{2.5}$ обеспечиваются при оптимальном сочетании данных спутниковых наблюдений за оптической плотностью аэрозоля (ОПА) с основанными на моделях предсказаниями $PM_{2.5}$. Такие объединенные виды продукции называются реанализом $PM_{2.5}$. В настоящее время доступны два вида продукции глобального реанализа: реанализ CMAK (CAMSRA) и реанализ Системы наблюдения Земли Годдарда для приборных групп УГМА (GEOS-IT).

Аномалии $PM_{2.5}$ 2023 года относительно базового периода 2003–2023 годов представлены на рисунке 1. Аномалии $PM_{2.5}$ в 2023 году были обусловлены исключительно сильными выбросами от летних лесных пожаров в Северном полушарии над территорией Северной Америки. Данные CMAK и GEOS-IT демонстрируют высокий уровень согласованности в определении местоположения и величины аномалии. Величина аномалии $PM_{2.5}$ над Северной Америкой в 2023 году была даже более выраженной, чем аномалии $PM_{2.5}$ 2021 года, вызванные сильными лесными пожарами в Сибири (ВМО, 2022 г.).

Положительная аномалия $PM_{2.5}$ над территорией Индии и отрицательные аномалии над Китаем и Европой были вызваны постепенным ростом или сокращением антропогенных выбросов в соответствующих регионах. Оба набора данных демонстрируют согласованность в направлении трендов, при этом тренды выглядят более выраженными в наборе данных CAMSRA, что может быть связано с более сильными трендами в базовых кадастрах антропогенных выбросов. Данные CAMSRA показывают тенденцию к снижению $PM_{2.5}$ над восточной частью Соединенных Штатов Америки, отсутствующую в наборе данных GEOS-IT.

Выбросы пустынной пыли зависят от таких метеорологических факторов, как скорость ветра и состояние почвы. Оба набора данных показывают более

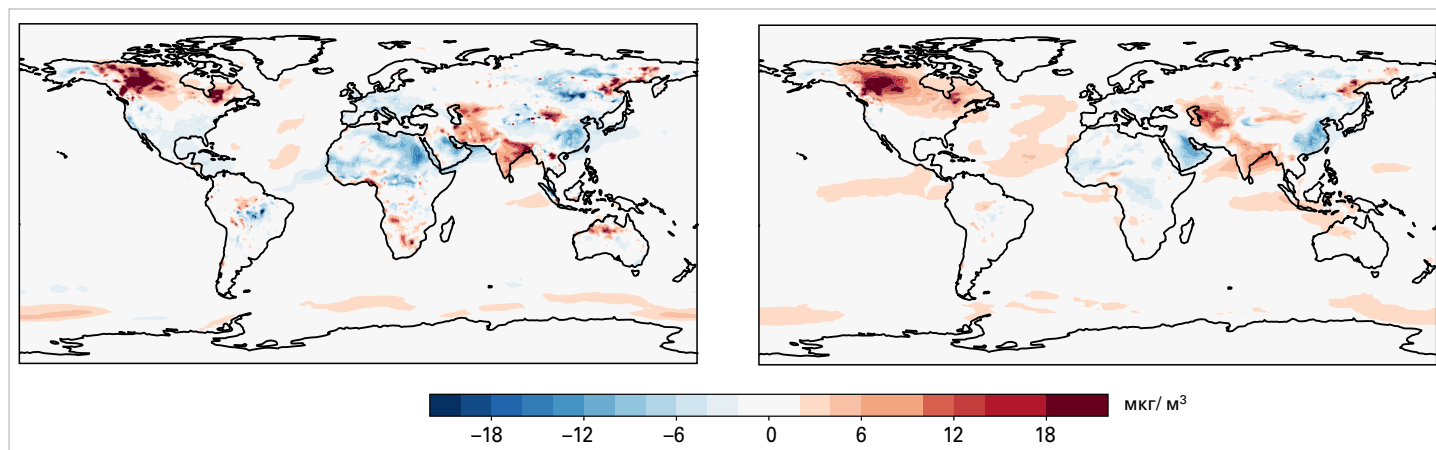


Рисунок 1. Аномалия $PM_{2.5}$ ($\mu\text{кг}/\text{м}^3$) в 2023 году (базовый период 2003–2022 гг.)

Источник: Получено на основе реанализа CMAK (слева) и реанализа GEOS-IT УГМА НАСА (справа) (https://gmao.gsfc.nasa.gov/GMAO_products/GEOS-IT/)

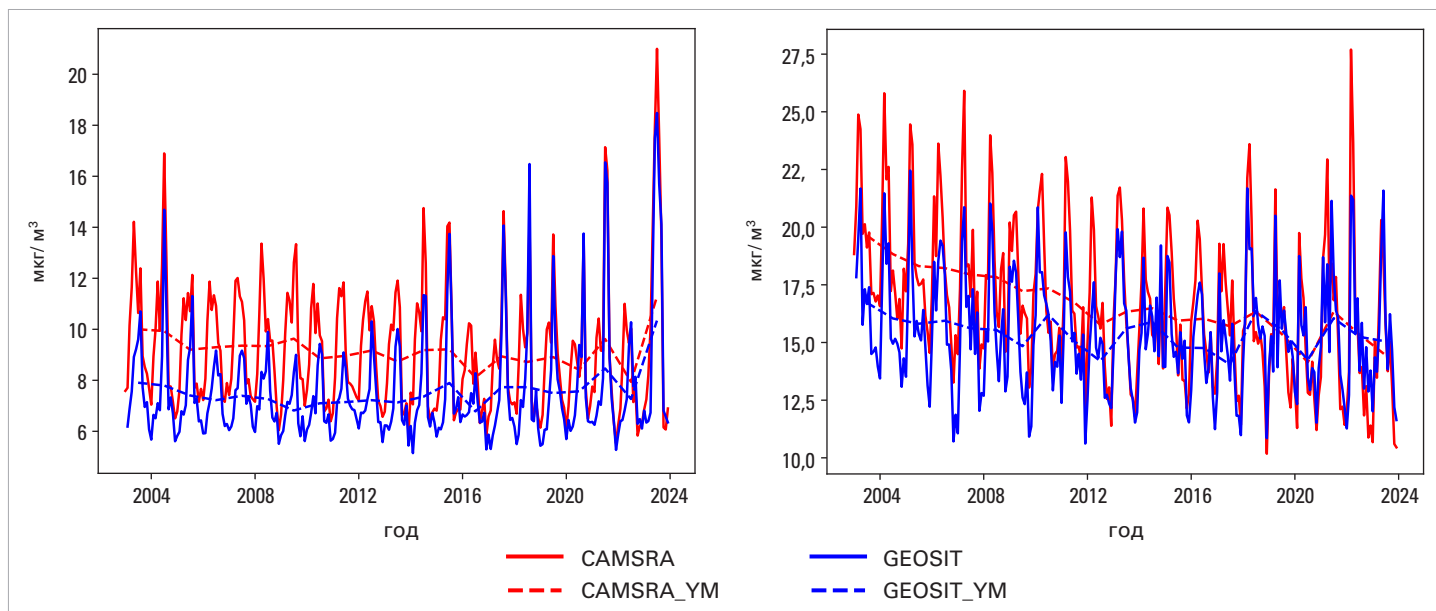


Рисунок 2. Временные ряды месячных (сплошная линия) и годовых (пунктирная линия) усредненных по площади концентраций $PM_{2.5}$ над Северной Америкой (слева) и Европой (справа)
Источник: Получено на основе данных CAMSRA (красный) и данных GEOS-IT (синий)

низкие, чем обычно выбросы пыли над пустынями Аравийского полуострова и большими территориями Северной Африки, где отрицательные аномалии были более выражены в наборе данных CAMSRA.

В целом, аномалии $PM_{2.5}$ 2023 года, полученные с помощью CAMSRA и GEOS-IT, имеют высокий уровень согласованности по пространственному распределению и в меньшей степени по величине. Это свидетельствует о надежности мониторинга, осуществляемого двумя центрами. Несмотря на высокий уровень согласованности в отношении изменчивости и трендов, сохраняются значительные различия в средней концентрации $PM_{2.5}$ в пределах от 20 до 30 % в зависимости от местоположения (рисунок 2). Разница в средних значениях $PM_{2.5}$ по данным CAMSRA и GEOS-IT с течением времени уменьшается, и в последние годы разрыв между ними становится меньше.

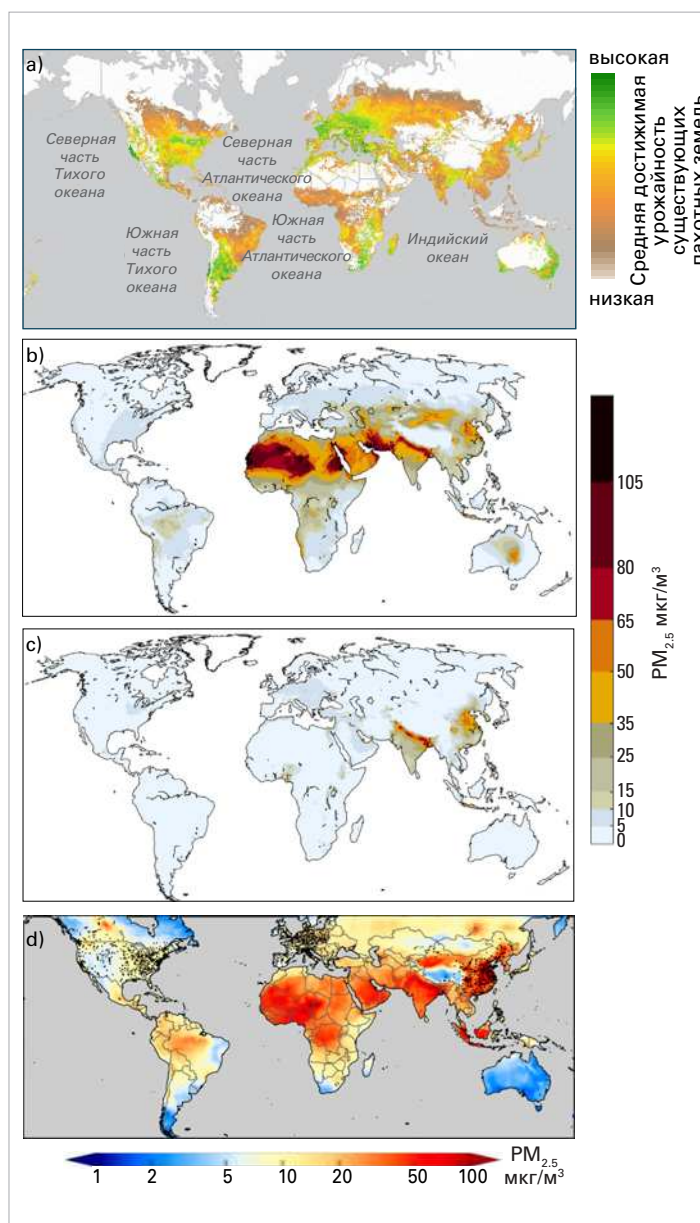
Воздействие атмосферных твердых частиц на сельскохозяйственные культуры

Фрэнк Дентенер, Джина Миллс, Уорд Смит, Джон Уокер

Учитывая, что согласно оценкам ежегодно от загрязнения атмосферы твердыми частицами (или «аэрозолями») преждевременно умирают восемь миллионов человек

Рисунок 3. Районы выращивания сельскохозяйственных культур и очаги $PM_{2.5}$ в мире в 2015 г.

- a) Площади выращивания сельскохозяйственных культур с указанием средней достижимой урожайности (Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) Global Agro-Ecological Zones (GAEZ) data portal);
- b) совокупные концентрации природных и антропогенных $PM_{2.5}$, смоделированные с помощью Модели взаимодействия и кумулятивного эффекта парниковых газов и загрязнения воздуха (GAINS) (Amann et al., 2020);
- c) концентрации $PM_{2.5}$ только из антропогенных источников, смоделированные с помощью GAINS (Amann et al., 2020);
- d) геофизические концентрации $PM_{2.5}$, установленные с помощью комбинации оптической плотности аэрозолей и наземных измерений, где черными точками обозначены места расположения мониторов (Hammer et al., 2020).



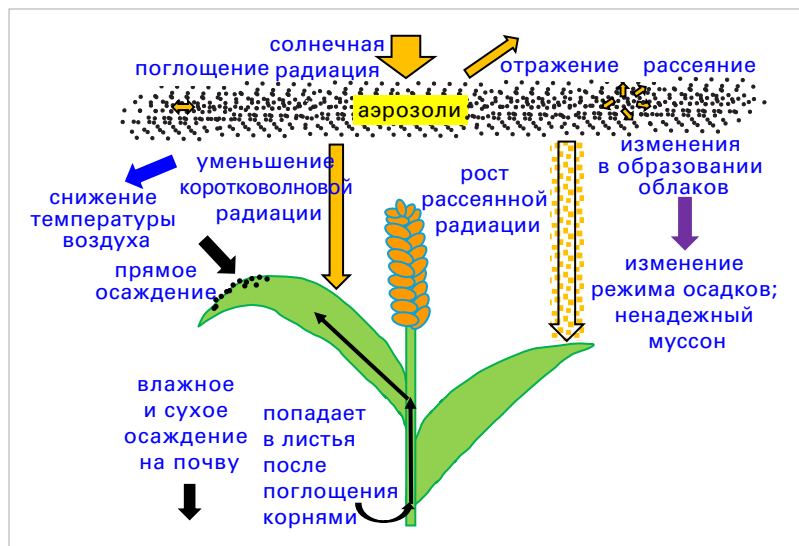


Рисунок 4. Многочисленные пути воздействия РМ на сельскохозяйственные культуры, включая прямое осаждение на листья и почву (черные стрелки) и косвенное воздействие через влияние на солнечный свет (солнечная, коротковолновая и рассеянная радиация: оранжевые стрелки), температуру (синяя стрелка) и дождевые осадки (фиолетовая стрелка).

Источник: The Impacts of Particulate Matter on Crop Yield: Mechanisms, Quantification and Options for Mitigation (Воздействия твердых частиц на урожайность сельскохозяйственных культур: механизмы, количественная оценка и варианты смягчения последствий) (WMO-No. 1340)

(Yin et al., 2021), глобальное воздействие РМ на здоровье по понятным причинам находится в центре внимания. В недавнем докладе ВМО (2023 г.) подчеркивается, что РМ также могут снижать продуктивность сельскохозяйственных культур в районах, где максимальный урожай имеет решающее значение для обеспечения продовольствием населения. Глобальные очаги РМ включают сельскохозяйственные районы в Центральной Африке, Пакистане, Индии, Китае и Юго-Восточной Азии (рисунок 3). В докладе также показано, что сельское хозяйство само по себе является одним из основных источников РМ за счет выброса частиц и их прекурсоров в результате сжигания стерни, применения удобрений и пестицидов, обработки почвы, сбора урожая, хранения и использования навоза. Присутствуя в воздухе в своем первоначальном виде или подвергаясь химической трансформации, эти частицы могут воздействовать на культуры, растущие поблизости, или переноситься в атмосфере на десятки и тысячи километров, воздействуя на культуры, расположенные на большом расстоянии.

Существующие стандарты в отношении РМ направлены на защиту людей от потребления сельскохозяйственных культур, которые могут нанести вред их здоровью. Например, съедобные части сельскохозяйственных культур могут быть заражены РМ, содержащими такие тяжелые металлы, как свинец и ртуть (Hou et al., 2020). Однако в этих стандартах не рассматриваются вопросы прямого и косвенного воздействия на производство продовольствия. В случае больших концентраций РМ (рисунок 3) сухое осаждение¹ РМ непосредственно влияет на сельскохозяйственные культуры, уменьшая количество солнечного света, попадающего на листовую поверхность, и физически блокируя устьица листьев, которые регулируют обмен водяным паром и диоксидом углерода с атмосферой (рисунок 4). Экспериментальные данные из Индии и Китая свидетельствуют о том, что сухое осаждение РМ в сильно загрязненных районах снижает урожайность сельскохозяйственных культур на 15 %. РМ также косвенно влияют на рост сельскохозяйственных культур, сказываясь на количестве и характеристиках солнечной радиации, достигающей поверхности Земли (рисунок 4). Например, согласно модельным исследованиям комбинированный

радиационный эффект привел к снижению урожайности риса и пшеницы в Китае в 2010-х годах на 4,6 и 4,7 % соответственно (Zhang et al., 2021). Аэрозоли также косвенно влияют на надежность урожайности сельскохозяйственных культур, например, воздействуя на режим осадков.

В недавно опубликованном докладе ВМО по РМ *The Impacts of Particulate Matter on Crop Yield: Mechanisms, Quantification and Options for Mitigation* (Воздействия твердых частиц на урожайность сельскохозяйственных культур: механизмы, количественная оценка и варианты смягчения последствий) (WMO No. 1340) описаны несколько действий, направленных на лучшее понимание и смягчение последствий влияния твердых частиц на сельскохозяйственные культуры. Наиболее практичным вариантом смягчения последствий в масштабах фермы является посадка деревьев или кустарников для физического укрытия сельскохозяйственных культур от местных источников РМ, которая дополнительно обеспечивает удержание углерода и преимущества биоразнообразия. В более широком смысле снижение выбросов и концентрации РМ в атмосфере имеют ключевое значение. Сельскохозяйственный сектор может сократить выбросы РМ за счет уменьшения эрозии почвы и парообразования аммиака, а также улучшения методов обработки почвы и обработки зерна. Политика борьбы с загрязнением воздуха позволила снизить концентрацию РМ в некоторых регионах (Европе, Северной Америке, Китае), однако в некоторых важных сельскохозяйственных регионах, таких как Индо-Гангская равнина в Пакистане, Индии и Бангладеш, а также на северо-востоке Китая, концентрация остается высокой (рисунок 3). Целенаправленному смягчению последствий в районах выращивания сельскохозяйственных культур, подверженных риску воздействия РМ, может способствовать расширение наземного и спутникового мониторинга твердых частиц (см. раздел «Данные о глобальной концентрации твердых частиц в 2023 году, полученные на основе двух видов продукции»). Для совершенствования моделей, используемых для прогнозирования будущей урожайности с учетом интерактивных воздействий изменения качества воздуха и климата, также необходимы новые исследования.

¹ Сухое осаждение — это перенос частиц и газов из атмосферы на поверхность Земли путем турбулентного движения, диффузии и гравитационного осаждения.

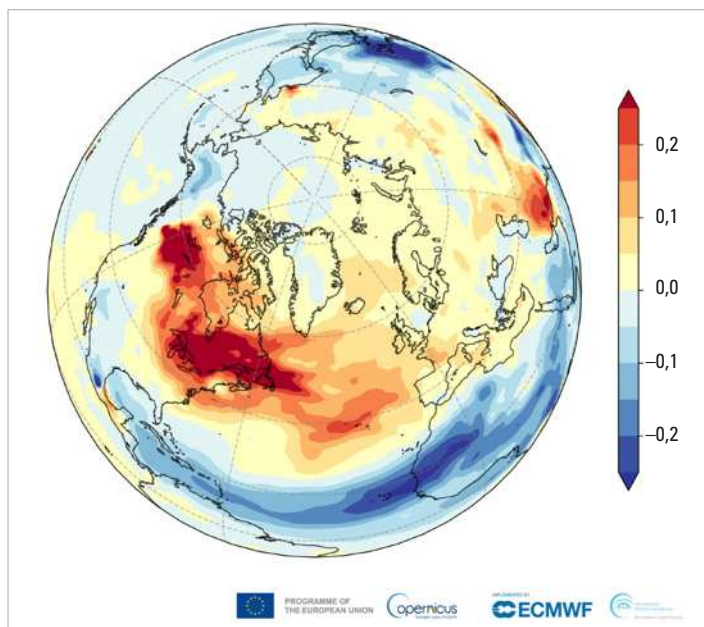


Рисунок 5. Среднемесячная аномалия общей оптической плотности аэрозолей в диапазоне 550 нм в июне 2023 г. относительно июня 2003–2022 гг.

Источник: Реанализ глобального состава атмосферы СМАК (2003–2023 гг.): <https://ads.atmosphere.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/cams-global-reanalysis-eac4-monthly?tab=overview>

Сезон лесных пожаров в Канаде в 2023 году

Марк Паррингтон, Раденко Павлович

Несколько исследований показали, что изменение климата может стать движущим фактором в установлении более теплых погодных условий, продолжительной засухи и сухой атмосферы в некоторых регионах мира. Такие условия повышают риск и вероятность распространения лесных пожаров, что, в свою очередь, оказывает серьезное воздействие на качество воздуха. Северная Америка, особенно ее западные территории, является одним из регионов, подверженных интенсивным и экстремальным лесным пожарам.

В результате сезона пожаров в Канаде в 2023 году был установлен рекорд по общей площади выжженной территории за много десятилетий: в семь раз больше,

чем в среднем за 1990–2013 годы (Canadian National Fire Database: <http://nfdp.ccfm.org/en/index.php>). Множество крупных и продолжительных пожаров возникло в период с первой недели мая, в течение всего лета и до последней недели сентября. Первые майские пожары начались на западе Канады, где было теплее и суше, чем обычно в это время года. Позднее в том же месяце первые пожары вспыхнули в Квебеке, к востоку от Гудзонова залива. Они были отмечены международными СМИ в связи с ухудшением качества воздуха на востоке Канады и северо-востоке Соединенных Штатов, особенно в Нью-Йорке, где в начале июня в течение нескольких дней наблюдалось сильное задымление. Дым от канадских лесных пожаров пересек также северную часть Атлантического океана и был обнаружен в ходе измерений, проводимых приборами Робототехнической сети по аэрозолям (AERONET) НАСА и самолетами в рамках программы эксплуатируемых воздушных судов для Глобальной системы наблюдений (ИАГОС) на юге Гренландии, Азорских островах и в Западной Европе.

Продолжение лесных пожаров на Северо-Западных территориях Канады в течение оставшейся части лета в Северном полушарии привело к тому, что суммарные общие расчетные выбросы значительно превысили годовой объем выбросов от лесных пожаров в Канаде, по крайней мере, с 2003 года. Накопление и устойчивость дымового загрязнения, и особенно аэрозолей, от пожаров нашли свое отражение в данных по общей оптической плотности аэрозолей, полученных по результатам глобального реанализа состава атмосферы СМАК, которые показали положительные аномалии относительно среднего значения за 2003–2022 годы за все месяцы с мая по сентябрь, что подчеркивает необычный характер лесных пожаров 2023 года (см., например, рисунок 5).

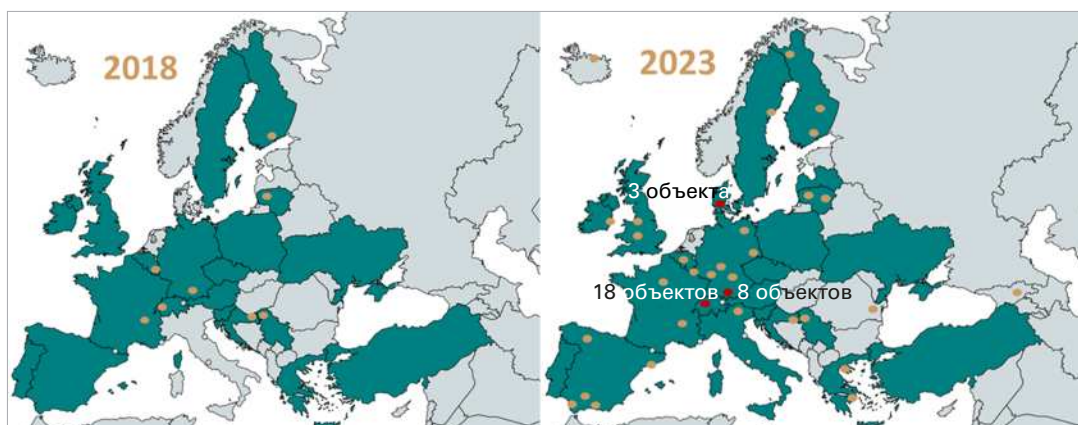
Аэробиология в переходный период: новые задачи и возможности

Михаил Софиев, Бернар Клот, Йерун Бутерс, Евгений Каданцев, Мика Комппула, Лючия Мона, Юлия Паламарчук, Сяоя Шан, Светлана Софиева-Риос, Ольга Созинова, Фиона Туммон, Ингрида Шаулиене

Информация о первичных биологических аэрозолях различного происхождения (например, пыльца растений, споры грибов, бактерии и т. д.) в атмосфере пользуется

Рисунок 6. Распространение автоматических мониторов для биоаэрозолей в 2018 и 2023 гг. Темно-зеленым цветом отмечены участники программы AutoPollen EBMETNET (<https://autopollen.net/>).

Источник: адаптировано из Tummon et al. (2024)



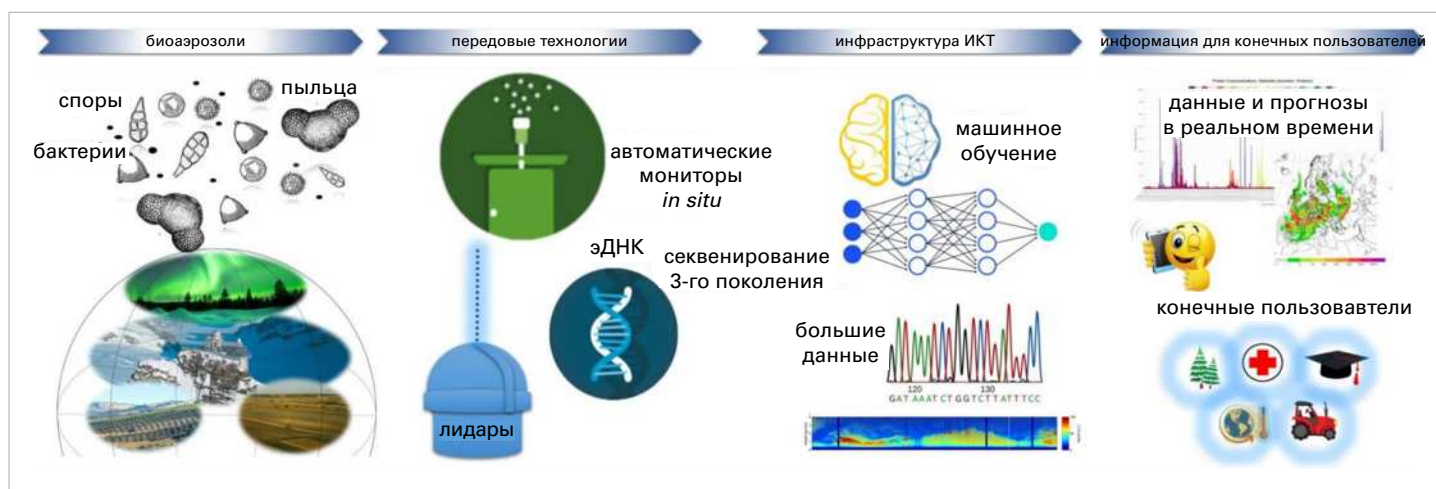


Рисунок 7. Компоненты новой парадигмы наблюдения за биоаэрозолями

Источник: <https://sylva.bioaerosol.eu>

большим спросом у практикующих врачей, аллергиков, специалистов в области сельского и лесного хозяйства, исследователей изменения климата, биоразнообразия и качества воздуха и многих других. Однако до недавнего времени аэриобиологический мониторинг осуществлялся ручным способом с использованием волуметрической ловушки для пыльцы и спор типа Hirst. Несмотря на то, что в свое время это был принципиально новый прибор, он подвергся серьезной критике за ограниченную точность и воспроизводимость результатов, а также за дорогостоящий ручной анализ (Adamov et al., 2021).

За последние несколько лет новые технологии позволили получать информацию о концентрациях биоаэрозолей в реальном масштабе времени (Buters et al., 2022; Tummon et al., 2024), анализировать вертикальные профили концентрации с помощью лидарных наблюдений (Shang et al., 2022) и проводить метагеномный анализ биоаэрозолей (подход, при котором исследуется весь генетический материал, извлеченный непосредственно из образца) с помощью

методов секвенирования ДНК третьего поколения (Sofiev et al., 2022). Все эти новые методы, находящиеся еще в стадии дальнейшей разработки, открывают совершенно новые возможности для широкого круга сторон, интересующихся биоаэрозолями. Новые приборы стоят дорого, но несмотря на большие первоначальные инвестиции автоматические мониторы для биоаэрозолей разворачиваются по всей Европе (см. рисунок 6), обеспечивая свободный доступ к данным, поскольку новые сети стремятся следовать принципам открытых данных и открытой науки.

Новые методы наблюдений в значительной степени опираются на такие передовые технологии, как анализ изображений с высоким разрешением, голография, многополосная скатерометрия, флуоресцентная спектроскопия и нанотехнологии для секвенирования ДНК. Задача распознавания частиц обычно решается с помощью подходов машинного обучения, то есть алгоритмов идентификации, разработанных на независимой основе для каждого типа устройств.

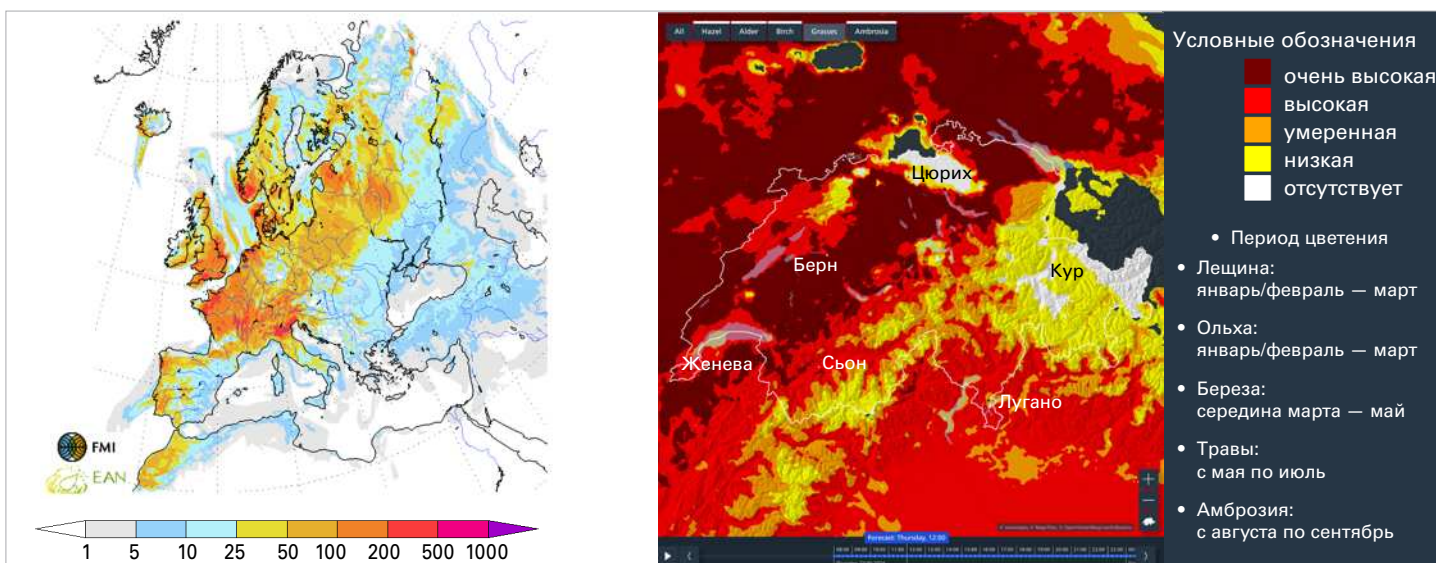


Рисунок 8. Примеры прогнозов концентрации пыльцы трав на 27 июня 2024 года для Европы (слева: прогноз, произведенный при помощи модели SILAM, пыльца/м³: <http://silam.fmi.fi>) и для Швейцарии (справа: прогноз, произведенный при помощи модели COSMO-ART, в диапазоне от «отсутствующей» до «очень высокой»: <http://www.meteoswiss.ch>). Прогнозы распространения пыльцы также можно получить через программу «Коперник»: <https://atmosphere.copernicus.eu/european-air-quality-forecast-plots>.

Это меняет существующую парадигму наблюдений за биоаэрозолями, поскольку сети мониторинга теперь требуют масштабной инфраструктуры данных, которая также предусматривает использование численных моделей в качестве интерфейса между различными технологиями и открытого моста для пользователей информации (см. рисунок 7). Алгоритмы идентификации частиц быстро развиваются, и наиболее продвинутые версии уже используются в оперативных сетях и реальных приложениях (Maya-Manzano et al., 2023).

Новые сети мониторинга биоаэрозолей позволили впервые интегрировать эти данные в реальном времени в приложения для моделирования в региональном и национальном масштабах (например, см. европейские и национальные прогнозы распространения пыльцы, приведенные на рисунке 8). Как часто бывает в вопросах качества воздуха, классическая ассимиляция данных о состоянии модели не приводит к какому-либо долгосрочному улучшению (Sofiev, 2019), но расширенные методы ассимиляции и предварительная обработка параметров модели в реальном времени улучшают навыки краткосрочного прогнозирования. Для оперативных приложений в масштабах всей Европы требуется более плотная сеть, чем существует в настоящее время (Sofiev et al., 2023), но технология реального времени показала высокую эффективность в области нового европейского пылевого реанализа. Эти разработки открывают новые возможности для прогнозирования в континентальном масштабе, как контролируемого, то есть с привлечением

эксперта для составления окончательного прогноза, так и не контролируемого, после демонстрации надежности прогнозов для некоторых приложений.

Биоаэрозоли играют важную роль в изучении климата: растительность является одним из наиболее чувствительных показателей изменения климата. Изменения биоразнообразия и время цветения растений, интенсивность и модели распределения чувствительны к метеорологическим условиям. Длинные временные ряды фенологических и аэриобиологических данных позволяют детально изучить изменчивость и оценить тренды (Ziska et al., 2019). Чрезвычайно важным является вопрос о том, представляют ли наблюдаемые тренды реакцию растений на конкретные условия того или иного года, то есть обратимые изменения, или же речь идет об адаптации к новым климатическим условиям, а значит, по сути, о необратимых изменениях (Fu et al, 2015).

Снижение образования атмосферных наночастиц на станциях Глобальной службы атмосферы

Сан-Ву Ким, До-Хён Парк

Охлаждающее и согревающее влияние аэрозольных частиц на климат Земли зависит от размера частиц, их химического состава и концентрации в атмосфере. Это влияние также различается в разных местах

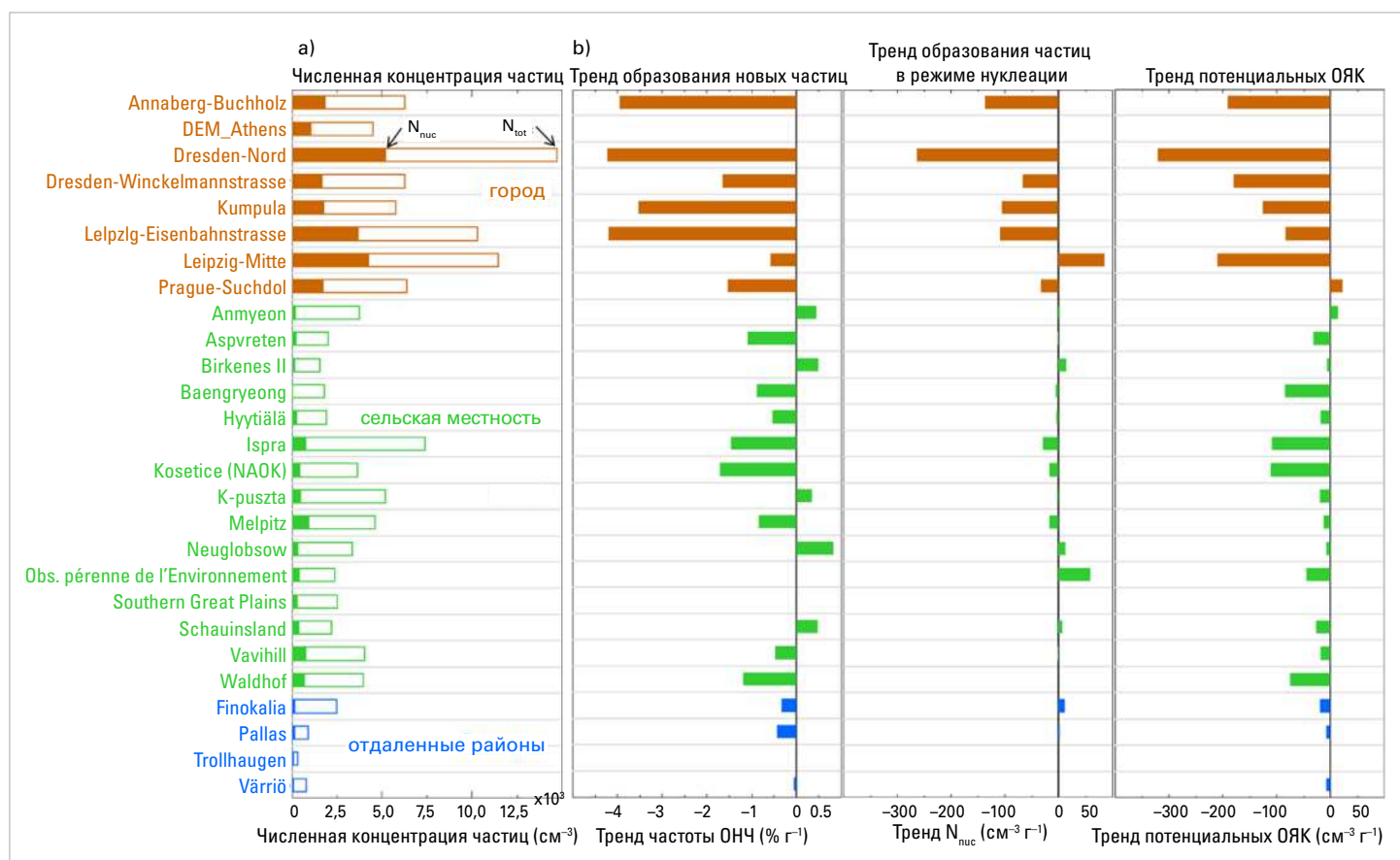


Рисунок 9. а) Общее среднее значение общей численной концентрации частиц (N_{tot}) и численной концентрации частиц в режиме нуклеации (N_{nuc}) в трех средах (город — коричневым, сельская местность — зеленым и отдаленные районы — синим), и б) годовые тренды в отношении частоты ОНЧ (слева), численной концентрации частиц в режиме нуклеации (в середине) и потенциальных облачных ядер конденсации (ОЯК) (N_{50}) (справа)

Источник: Park, D.-H. и Kim, S.-W.

и в разное время, что обусловлено различными источниками аэрозолей и их относительно коротким сроком существования в атмосфере. Недавние глобальные анализы связанных с климатом свойств аэрозолей по данным многолетних наблюдений в приповерхностных обсерваториях Программы ГСА ВМО показали несомненное снижение рассеяния и поглощения света частицами в Европе и Северной Америке. Эти анализы также позволили получить самую актуальную картину пространственного распределения численной концентрации твердых частиц и численного фракционного состава частиц (ЧФСЧ) (Collaud Coen et al., 2020; Laj et al., 2020; Rose et al., 2021).

В продолжение этих усилий были проанализированы контролируемые по качеству данные ЧФСЧ с 27 станций ГСА, расположенных в городских, сельских и отдаленных районах, для оценки трендов, касающихся i) образования новых частиц (ОНЧ) и ii) частиц в режиме нуклеации. ОНЧ включает в себя образование более крупных частиц, которые могут выступать в качестве посевного материала для образования облачных капель. Частицы в режиме нуклеации — это частицы диаметром от 10 до 25 нм. Как ОНЧ, так и частицы в режиме нуклеации представляют особый интерес, поскольку они тесно связаны с качеством воздуха (здоровьем человека), образованием облаков и климатическими воздействиями.

В городских районах наблюдались самые высокие концентрации общего количества частиц, достигавшие максимума при диаметре около 20 нм, что свидетельствует о частых явлениях, связанных с ОНЧ. Частицы, образующиеся в режиме нуклеации, преобладали в общем количестве частиц в городских районах (см. рисунок 9а)). В дни, характеризующиеся явлениями,

связанными с ОНЧ, численные концентрации общего количества частиц были на 100–200 % выше, чем в дни, когда такие явления не наблюдались, свидетельствуя о значительном повышении уровня частиц благодаря ОНЧ. Наибольшая частота ОНЧ, составляющая около 40 %, была обнаружена в городских районах против примерно 30 % в отдаленных районах с минимальными местными выбросами.

Десятилетние тренды к уменьшению были обнаружены в подавляющем большинстве случаев как в отношении частоты ОНЧ, так и в плане концентраций частиц в режиме нуклеации на всех типах объектов, особенно в городских районах (см. рисунок 9b)). Например, частота ОНЧ снижалась в городских районах на 4 % в год.

Уменьшение количества частиц в режиме нуклеации было тесно связано с уменьшением концентрации потенциальных облачных ядер конденсации (ОЯК) (N_{50} , то есть частиц диаметром более 50 нм: см. рисунок 9b)). Концентрации потенциальных ОЯК (N_{50}) были на 70–170 % выше в дни ОНЧ, давая основания предполагать, что сокращение случаев ОНЧ снижает концентрации имеющихся ОЯК в различных регионах по всему миру. Такое изменение уровня ОЯК из-за уменьшения количества частиц в режиме нуклеации может повлиять на микрофизические свойства облаков и их воздействие на радиацию через изменения в формировании облачных капель.

Тренды к уменьшению ОНЧ, а следовательно, количества частиц и концентраций ОЯК, обусловлены трендами к снижению выбросов загрязнителей-прекурсоров. Хотя снижение уровня загрязнения воздуха, несомненно, полезно для здоровья людей и состояния окружающей

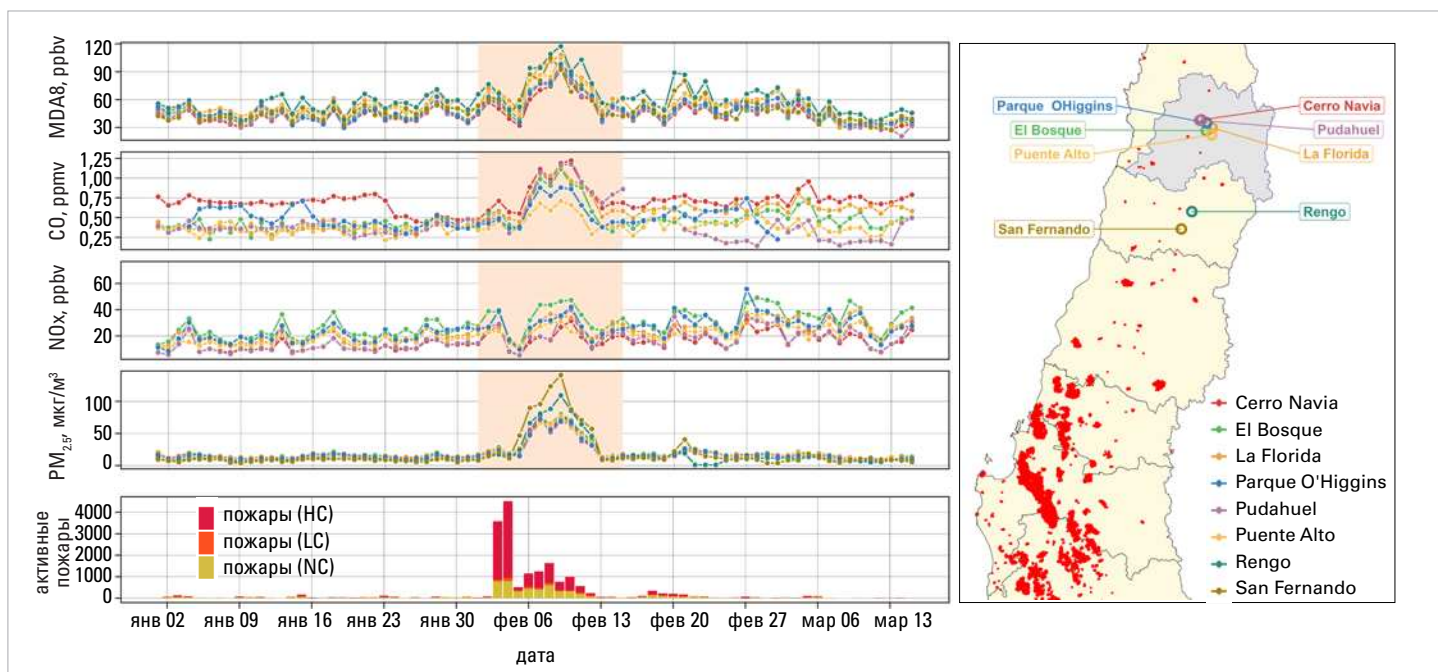


Рисунок 10. Временные ряды максимальных среднесуточных показателей озона, окиси углерода (CO) (в частях на миллион по объему (ppmv)), оксидов азота (NO_x) и мелких твердых частиц ($PM_{2.5}$), измеряемых в течение 8 часов (MDA8), по данным отдельных станций мониторинга качества воздуха (MDA8>50 ppbv) за период с января по март 2023 г. В нижнем блоке представлены ежедневные (24 ч) данные об активных пожарах, полученные на основе спутниковой продукции MODIS (<https://modis-fire.umd.edu>) с разрешением 1 км (MOD13A1), со столбцами разного цвета, обозначающими степень достоверности (высокая (НС), номинальная (NC) и низкая (LC)) на основе эмиссии инфракрасной радиации. На карте (правый блок) показаны активные пожары, наблюдавшиеся в феврале в центральной части Чили. Столичный регион Сантьяго, где расположено большинство станций мониторинга, обозначен серым цветом.

Источник: адаптировано из Seguel et al. (2024) (добавление $PM_{2.5}$) в [Creative Commons License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

среды, у него имеются и непредвиденные побочные действия, требующие тщательного мониторинга, особенно в районах мегаполисов с высоким уровнем загрязнения. Уменьшение концентраций частиц снижает уровень вредных $PM_{2.5}$ (см. выше), однако, в зависимости от отражательной способности типа частиц, может оказывать различное воздействие на радиацию, достигающую поверхности Земли. При снижении количества светлых частиц, имеющих большую отражающую способность, больше солнечного света может достигать поверхности и, следовательно, нагревать ее, поскольку затеняющий эффект аэрозолей уменьшается. Этот эффект «демаскировки аэрозоля», вызванный мерами по контролю за уровнем загрязнения, был кратковременно отмечен во время пандемии COVID-19, когда выбросы снизились из-за режима изоляции (Nair et al., 2023). Такие тренды могут привести к превышению целевых показателей по климату и повышению риска сильного теплового стресса для больших групп населения. Однако для темных частиц, поглощающих свет, дело может обстоять противоположным образом, что указывает на необходимость постоянных наблюдений и попыток смоделировать и понять эти сложные, иногда конкурирующие воздействия.

Экстремальные лесные пожары в центральной части Чили повлияли на качество воздуха в начале 2023 года

Родриго Сегуэль, Мария Касорла, Лукас Кастильо, Томас Карраско-Эскафф, Лаура Гальярдо

В январе и феврале 2023 года центральные и южные районы Чили были охвачены разрушительными лесными пожарами, возникшими к югу от Столичного региона Сантьяго. В результате более 400 пожаров, большинство из которых были умышленными поджогами, были выжжены обширные площади плантаций и лесов. Экстремальные температуры окружающего воздуха способствовали разрастанию пожаров в районе, который уже более десяти лет страдает от повсеместной засухи. Национальная система информации о качестве воздуха зафиксировала последствия этих катастрофических явлений, которые привели к повышению уровней всех загрязнителей воздуха на всех станциях, как показано на рисунке 10.

Во время наиболее интенсивного периода активных пожаров ежедневное краткосрочное воздействие загрязнения озоном (на основе максимального среднесуточного показателя, измеряемого в течение 8 часов (MDA8)) резко возросло на нескольких станциях мониторинга, достигая коэффициентов смешения до 117 частей на миллиард по объему (ppbv) (на станции Ренго). Такие уровни воздействия контрастируют с типичными значениями MDA8 для летних месяцев в центральной части Чили, которые обычно высоки, хотя и близки к нормативам ВОЗ по озону (51 ppbv). Кроме того, высокие уровни окиси углерода свидетельствовали об увеличении количества прекурсоров озона в окружающем воздухе, а концентрация мелких твердых частиц достигла 141 мкг/м^3 (на станции Сан-Фернандо). Эти явления привели к выявлению положительной аномалии в долгосрочных трендах озона (Seguel et al., 2024). Атмосферные условия — сильный ветер,

устойчивое высокое давление и температура около 40°C — стали ключевыми факторами распространения пожаров. Большие дымовые шлейфы просматривались из космоса в течение двух месяцев пожарной активности.

Из-за разрушений и смертей, вызванных пожарами, а также высоких уровней загрязнения атмосферы власти Чили объявили чрезвычайное экологическое положение в различных регионах центральной части страны. Эти катастрофические события унесли жизни 25 человек и нанесли серьезный ущерб домохозяйствам тысяч граждан. Несмотря на то, что Чили приложила значительные усилия для повышения готовности страны к продолжительным сезонам пожаров, недостаточное территориальное планирование в городах и пригородных зонах по-прежнему приводит к пагубным последствиям. Эти явления становятся все более частыми под влиянием изменения климата. Поэтому для того, чтобы в ближайшие годы надлежащим образом решить проблему устойчивости городов, необходимо провести масштабную работу, основанную на практической междисциплинарной науке.

Заключение

В четвертом выпуске Бюллетеня ВМО по качеству воздуха и климату рассматривается состояние науки и освещаются некоторые заметные события, произошедшие в 2023 году. Оценка годовых аномалий $PM_{2.5}$ включает результаты двух центров глобального моделирования (СМАК и УГМА НАСА) и обсуждение их сходств и различий. Более подробное описание негативного влияния РМ на сельское хозяйство представлено в следующем разделе, обобщающем выводы из недавнего доклада ВМО *The Impacts of Particulate Matter on Crop Yield: Mechanisms, Quantification and Options for Mitigation* («Воздействия твердых частиц на урожайность сельскохозяйственных культур: механизмы, количественная оценка и варианты смягчения последствий») (WMO No. 1340).

Беспрецедентные североамериканские лесные пожары 2023 года и их воздействие на качество воздуха в районах, расположенных с подветренной стороны, в регионе и за его пределами описываются в последующем разделе. Далее говорится о появлении новых возможностей мониторинга и прогнозирования в отношении биологических аэрозолей, включая пыльцу, споры грибов и бактерии, а также обсуждаются важные взаимосвязи между этими биоаэрозолями и климатом.

В следующем разделе рассматриваются данные многолетних измерений аэрозолей, собранные на станциях ВМО ГСА по всему миру, и делается вывод о том, что частота образования новых частиц уменьшается, сказываясь на формировании облаков и радиационном воздействии облаков и аэрозолей. Наконец, в последнем разделе подробно описывается экстремальное загрязнение озоном в Чили, вызванное лесными пожарами в начале 2023 года. Одновременные наблюдения за озоном, окисью углерода, оксидами азота и $PM_{2.5}$ в центральной части Чили свидетельствуют о том, что интенсивные и продолжительные лесные пожары, которые становятся все более распространенными в условиях потепления климата, крайне негативно сказываются на качестве воздуха.

Список использованной литературы

- Adamov, S.; Lemonis, N.; Clot, B. et al. On the Measurement Uncertainty of Hirst-type Volumetric Pollen and Spore Samplers. *Aerobiologia* **2021**, *40*, 77–91. <https://doi.org/10.1007/s10453-021-09724-5>.
- Amann, M.; Kieseewetter, G.; Schöpp, W. et al. Reducing Global Air Pollution: The Scope for Further Policy Interventions. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* **2020**, *378* (2183). <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0331>.
- Buters, J.; Clot, B.; Galán, C. et al. Automatic Detection of Airborne Pollen: An Overview. *Aerobiologia* **2022**, *40*, 13–37. <https://doi.org/10.1007/s10453-022-09750-x>.
- 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>.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). *GAEZ Data Portal* web page. <https://gaez.fao.org/>.
- Fu, Y. H.; Zhao, H.; Piao, S. et al. Declining Global Warming Effects on the Phenology of Spring Leaf Unfolding. *Nature* **2015**, *526*, 104–107. <https://doi.org/10.1038/nature15402>.
- Hammer, M. S.; van Donkelaar, A.; Li, C. et al. Global Estimates and Long-term Trends of Fine Particulate Matter Concentrations (1998–2018). *Environmental Science & Technology* **2020**, *54* (13), 7879–7890. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c01764>.
- Hou, D.; O'Connor, D.; Igalavithana, A. D. et al. Metal Contamination and Bioremediation of Agricultural Soils for Food Safety and Sustainability. *Nature Reviews Earth and Environment* **2020**, *1*, 366–381. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0061-y>.
- Laj, P.; Bigi, A.; Rose, C. et al. A Global Analysis of Climate-relevant Aerosol Properties Retrieved from the Network of Global Atmosphere Watch (GAW) Near-surface Observatories. *Atmospheric Measurement Techniques* **2020**, *13* (8), 4353–4392. <https://doi.org/10.5194/amt-13-4353-2020>.
- Maya-Manzano, J. M.; Tummon, F.; Abt, R. et al. Towards European Automatic Bioaerosol Monitoring: Comparison of 9 Automatic Pollen Observational Instruments with Classic Hirst-type Traps. *Science of the Total Environment* **2023**, *866*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161220>.
- Mina, U.; Chandrashekhara, T. K.; Kumar, S. N. et al. Impact of Particulate Matter on Basmati Rice Varieties Grown in Indo-Gangetic Plains of India: Growth, Biochemical, Physiological and Yield Attributes. *Atmospheric Environment* **2018**, *188*, 174–184. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.06.015>.
- Nair, H. R. C. R.; Budhavant, K.; Manoj, M. R. et al. Aerosol Demasking Enhances Climate Warming over South Asia. *Climate and Atmospheric Science* **2023**, *6*, 39. <https://doi.org/10.1038/s41612-023-00367-6>.
- Rose, C.; Collaud Coen, M.; Andrews, E. et al. Seasonality of the Particle Number Concentration and Size Distribution: A Global Analysis Retrieved from the Network of Global Atmosphere Watch (GAW) Near-surface Observatories. *Atmospheric Chemistry and Physics* **2021**, *21* (22), 17185–17223. <https://doi.org/10.5194/acp-21-17185-2021>.
- Seguel, R. J.; Castillo, L.; Opazo, C. et al. Changes in South American Surface Ozone Trends: Exploring the Influences of Precursors and Extreme Events. *Atmospheric Chemistry and Physics* **2024**, *24* (14). <https://doi.org/10.5194/acp-24-8225-2024>.
- Shang, X.; Baars, H.; Stachlewska, I. S. et al. Pollen Observations at Four EARLINET Stations During the ACTRIS-COVID-19 Campaign. *Atmospheric Chemistry and Physics* **2022**, *22* (6), 3931–3944. <https://doi.org/10.5194/acp-22-3931-2022>.
- Sofiev, M. On Possibilities of Assimilation of Near-real-time Pollen Data by Atmospheric Composition Models. *Aerobiologia* **2019**, *35*, 523–531. <https://doi.org/10.1007/s10453-019-09583-1>.
- Sofiev, M.; Sofieva, S.; Palamarchuk, J. et al. Bioaerosols in the Atmosphere at Two Sites in Northern Europe in Spring 2021: Outline of an Experimental Campaign. *Environmental Research* **2022**, *214*. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113798>.
- Sofiev, M.; Buters, J.; Tummon, F. et al. Designing an Automatic Pollen Monitoring Network for Direct Usage of Observations to Reconstruct the Concentration Fields. *Science of the Total Environment* **2023**, *900*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165800>.
- Tummon, F.; Adams-Groom, B.; Antunes, C. M. et al. The Role of Automatic Pollen and Fungal Spore Monitoring Across Major End-user Domains. *Aerobiologia* **2024**, *40*, 57–75. <https://doi.org/10.1007/s10453-024-09820-2>.
- 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. <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). *The Impacts of Particulate Matter on Crop Yield: Mechanisms, Quantification and Options for Mitigation* (WMO-No. 1340). Geneva, 2023.
- Yin, H.; Brauer, M.; Zhang, J. et al. Population Ageing and Deaths Attributable to Ambient PM_{2.5} Pollution: A Global Analysis of Economic Cost. *The Lancet Planetary Health* **2021**, *5*, E356–E367. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(21\)00131-5](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(21)00131-5).
- Zhang, T.; Yue, X.; Unger, N. et al. Modeling the Joint Impacts of Ozone and Aerosols on Crop Yields in China: An Air Pollution Policy Scenario Analysis. *Atmospheric Environment* **2021**, *247*. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOENV.2021.118216>.
- Ziska, L. H.; Makra, L.; Harry, S. K. et al. Temperature-related Changes in Airborne Allergenic Pollen Abundance and Seasonality Across the Northern Hemisphere: A Retrospective Data Analysis. *The Lancet Planetary Health* **2019**, *3*, e124–e131. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(19\)30015-4](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(19)30015-4).

Отказ от ответственности

Обозначения, употребляемые в настоящем Бюллетене, соответствуют практике Организации Объединенных Наций. Представление в нем материала не подразумевает выражения мнения со стороны ВМО относительно правового статуса какой-либо страны, области или территории или их органов власти или относительно делимитации их границ или рубежей. Описание и использование границ, географических названий и связанных с ними данных, отображаемых на картах и включаемых в списки, таблицы, документы и базы данных в настоящем Бюллетене, не гарантируют отсутствие ошибок и необязательно подразумевают официальное одобрение или признание со стороны ВМО.

Выражение признательности и ссылки

Авторы раздела «[Введение](#)» хотели бы выразить признательность Патриции Крекл, Каради Райт и Вэй Вань за помощь в редактировании и рецензировании.

Авторы раздела, озаглавленного «[Снижение образования атмосферных наночастиц на станциях Глобальной службы атмосферы](#)», хотели бы выразить свою признательность всей команде, ответственной за измерение численного фракционного состава частиц, а также техническому и научному персоналу, чьи усилия способствовали осуществлению программы ГСА. Сан-Ву Ким действовал при поддержке Национального исследовательского фонда Кореи (2017R1D1A1B06032548). Данные доступны в Мировом центре данных по аэрозолям (МЦДА: <https://www.gaw-wdca.org/>) или на веб-странице EBAS (<https://ebas-data.nilu.no/>).

Редакционный совет в алфавитном порядке

Председатель: д-р 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 по проблемам загрязнения окружающей среды и химии атмосферы ГСА ВМО), 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), Национальное управление по исследованию океанов и атмосферы (НУОА), Лаборатория химических наук (ЛХН), США

Фрэнк Дентенер (член Инициативы ГСА ВМО по объединению данных измерений и результатов моделирования для оценки глобального суммарного атмосферного осаднения), Объединенный научно-исследовательский центр (ОИЦ) Европейской комиссии, Испра, Италия

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

Авторы раздела «[Сезон лесных пожаров в Канаде в 2023 году](#)» выражают благодарность Родриго Муньосу-Альписару за помощь в составлении и предоставлении статистики по лесным пожарам в Канаде.

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

Ни Европейская комиссия, ни Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды (ЕЦСПП) не несут ответственности за любое использование информации программы «Коперник» или содержащихся в ней данных.

Латойя Майлз (сопредседатель Научно-консультативной группы ГСА ВМО по суммарному атмосферному осаднению), НУОА, Бюро исследований океана и атмосферы, Лаборатория ресурсов атмосферы, Ок-Ридж, США

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 Великобритании и Северной Ирландии; Бонн, Германия)

Джессика Седдон (сопредседатель Руководящего комитета Глобальной информационно-прогностической системы по качеству воздуха ГСА ВМО), Йельская школа глобальных отношений имени Джексона, США, и Лаборатория институциональной архитектуры

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

Все авторы в алфавитном порядке

- Йерун Бутерс, Мюнхенский технический университет, Германия
- Томас Карраско-Эскафф, кафедра геофизики, факультет физических наук и математики, Чилийский университет, Чили, и Центр исследований в области климата и устойчивости, Чили
- Лукас Кастильо, кафедра геофизики, факультет физических наук и математики, Чилийский университет, Чили, и Центр исследований в области климата и устойчивости, Чили
- Мария Касорла, Universidad San Francisco de Quito, Colegio de Ciencias e Ingenierías, Instituto de Investigaciones Atmosféricas, Ecuador (Университет Сан-Франциско-де-Кито, Коллегия наук и инженерии, Институт атмосферных исследований, Эквадор)
- Бернар Клот, МетеоСвис, Швейцария
- Алли Коллоу, Университет Мэриленда, США, и Управление глобального моделирования и ассимиляции НАСА, США
- Фрэнк Дентенер, Объединенный научно-исследовательский центр (ОИЦ) Европейской комиссии, Испра, Италия
- Йоханнес Флемминг, Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды (ЕЦСПП), Бонн, Германия
- Лаура Гальярдо, кафедра геофизики, факультет физических наук и математики, Чилийский университет, Чили, и Центр исследований в области климата и устойчивости, Чили
- Евгений Каданцев, Финский метеорологический институт, Финляндия
- Сан-Ву Ким, факультет наук о Земле и окружающей среде, Национальный университет Сеула, Республика Корея
- Мика Комппула, Финский метеорологический институт, Финляндия
- Джина Миллс, Центр по экологии и гидрологии Соединенного Королевства, Центр по вопросам окружающей среды Уэльса, Соединенное Королевство, и факультет биологических наук и наук об окружающей среде, Гётеборгский университет, Швеция
- Люция Мона, Институт методологии анализа окружающей среды, Национальный совет Италии по научным исследованиям (НСИ), Потенца, Италия
- Джули М. Найсли, Университет Мэриленда, США, и НАСА, США
- Юлия Паламарчук, Финский метеорологический институт, Финляндия
- До-Хён Парк, Центр исследования устойчивости окружающей среды, Корейский институт научно-технической информации, Республика Корея
- Марк Паррингтон, Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды (ЕЦСПП), Бонн, Германия
- Раденко Павлович, Метеорологическая служба Канады, Министерство охраны окружающей среды Канады (МООСК)
- Лу Рен, Региональный учебный центр ВМО, Нанкин (РУЦ-Нанкин), Нанкинский университет информации, науки и технологий (НУИНТ)
- Ингрида Шаулиене, Вильнюсский университет, Литва
- Джессика Седдон, Йельская школа глобальных отношений имени Джексона, США, и Лаборатория институциональной архитектуры
- Родриго Сегуэль, кафедра геофизики, факультет физических наук и математики, Чилийский университет, Чили, и Центр исследований в области климата и устойчивости, Чили
- Сяоя Шан, Финский метеорологический институт, Финляндия
- Вард Н. Смит, Министерство сельского хозяйства и продовольствия Канады, Сектор по науке и технике, Оттава, Канада
- Михаил Софиев, Финский метеорологический институт, Финляндия
- Светлана Софиева-Риос, Финский метеорологический институт, Финляндия
- Ольга Созинова, Латвийский университет, Латвия
- Фиона Туммон, МетеоСвис, Швейцария
- Джон Уокер, Агентство по охране окружающей среды, США, Управление исследований и разработок, Дарем, США
- Тун Чжу, Пекинский университет, Китай

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>