

Стратосферный аэрозоль над регионом Казахстана по данным спутника Suomi NPP

Р. Ю. Лукьянова

*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: renata@aari.ru*

Показана эволюция стратосферного аэрозоля над регионом Казахстана в 2012–2021 гг. по вертикальным профилям, полученным с помощью лимбового зондировщика КА Suomi NPP. Анализ изменчивости среднесуточных коэффициентов экстинкции показал, что установившееся после 2012 г. фоновое состояние аэрозольного наполнения стратосферы было нарушено появлением летом 2017 г. короткоживущего, а летом 2019 г. — долгоживущего слоя повышенной плотности. Формирование слоёв может быть связано с дальним переносом высотными струйными течениями продуктов горения во время бореальных пожаров. Появление слоя в 2017 г. может быть связано с узким высотным струйным течением, посредством которого осуществлялся межконтинентальный перенос сажевого продукта, образовавшегося во время лесных пожаров в северной Америке. Однако обнаруженный над Казахстаном слой состоял из крупных частиц, которые вряд ли могут переноситься на большие расстояния. Наблюдаемый в течение года относительно толстый слой мелкодисперсного аэрозоля, образовавшийся в июле 2019 г., явно сформировался из поднявшихся в нижнюю стратосферу продуктов горения во время сибирских пожаров и распространился на Казахстан через первоначальный быстрый вынос в Арктику и последующий меридиональный перенос в южном направлении. В целом фоновый уровень стратосферного аэрозоля в регионе после 2017 г. повысился в 1,5–2 раза по сравнению с началом периода наблюдений.

Ключевые слова: стратосфера, аэрозоль, спутниковые наблюдения, вертикальный профиль, дальний перенос

Одобрена к печати: 16.03.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-229-237

Введение

Атмосферные аэрозоли, образующиеся в результате крупных вулканических извержений, а также пироконвективных систем, могут поступать непосредственно в стратосферу. Стратосферный аэрозоль находится в слое на высоте от 15 до 25 км с пиком около 20 км (Junge et al., 1961). Вариации аэрозоля на этих высотах оказывают значительное влияние на климат. Долгоживущий стратосферный аэрозоль существенно влияет на радиационный бюджет Земли. Частицы сульфатного аэрозоля рассеивают солнечную коротковолновую радиацию обратно в космос, увеличивая планетарное альbedo. Сажевый аэрозоль рассматривается как поглощающий радиацию. В стратосфере, где циркуляция воздушных масс существенно отличается от тропосферной, а возрастание температуры с высотой делает среду термически и динамически устойчивой, эффекты упорядоченного движения аэрозольных частиц проявляются наиболее отчётливо. Модельные расчёты и наблюдения показали, что увеличение загрязнения арктического региона антропогенным аэрозолем во многом обусловлено межширотным переносом в средней атмосфере (Koch, Hansen, 2005; Kremser et al., 2016; Ohneiser et al., 2021). Однако из-за сложности измерений до сих пор существует значительная неопределённость в балансе стратосферных аэрозолей в различных географических зонах.

Республика Казахстан отличается особыми географическими и климатологическими условиями. С точки зрения стратосферной циркуляции регион находится под нисходящей ветвью циркуляции Брюера–Добсона. С севера до этих широт часто распространяется влияние зимнего полярного вихря. В тёплый сезон дополнительный поток аэрозолей в стратосферу, возникающий в результате азиатского летнего муссона, может приходиться с юго-востока (Yu et al., 2017). Рост аэрозольной нагрузки в стратосфере над Казахстаном может быть связан

с дальним высотным переносом продуктов лесных пожаров, количество и интенсивность которых в последние годы увеличивается (Spreading..., 2022). Свой вклад также вносит растущее поступление антропогенного аэрозоля, главным образом из тропосферы вследствие развития промышленности в регионе и деятельности расположенного в регионе космодрома.

Существует ограниченное количество методов наблюдения стратосферных аэрозолей. Основными представляются измерения с помощью лидаров, расположенных в определённых географических точках, и измерения из космоса, которые позволяют получить распределение вертикальных профилей аэрозоля на обширной территории. При этом количество космических аппаратов (КА), оснащённых соответствующими радиометрами, весьма ограничено. В настоящее время измерения стратосферного аэрозоля продолжают КА NASA (*англ.* National Aeronautics and Space Administration, Национальное управление по авионавигации и исследованию космического пространства США): OSIRIS (*англ.* Origins Spectral Interpretation Resource Identification Security, Исследователь происхождения спектральной интерпретации, идентификации ресурсов и безопасности реголита), CALIPSO (*англ.* Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation) и Suomi NPP (*англ.* Suomi National Polar-orbiting Partnership). Два первых находятся на орбите соответственно с 2001 и 2006 г. и к настоящему времени значительно превысили запланированный срок службы. КА Suomi NPP запущен в 2011 г. В данной статье для изучения эволюции аэрозольной нагрузки в стратосфере региона мы используем наблюдения установленного на этом КА прибора OMPS (*англ.* Ozone Mapping and Profiling Suite) последней версии, доступные с 2012 г. по настоящее время.

Космический аппарат и данные

Космический аппарат Suomi NPP находится на полярной (наклонение $98,7^\circ$) солнечно-синхронной орбите на высоте 824 км и совершает 14 витков вокруг Земли за сутки. Прибор OMPS состоит из трёх датчиков, два из которых ведут наблюдения в надир, и один, OMPS-LP (*англ.* Ozone Mapping and Profiler Suite Limb Profile), проводит лимбовое зондирование. Для получения информации о стратосферных аэрозолях используется OMPS-LP, который регистрирует солнечное излучение, рассеянное атмосферой. В отличие от сенсоров, установленных на более ранних спутниках, OMPS-LP использует не дифракционную решётку, а призму, рассеивающую свет на двумерном детекторе, который регистрирует яркость одновременно со всех высот и на длинах волн от 500 до 1000 нм со спектральным разрешением от 1 до 30 нм в зависимости от длины волны. Вследствие нелинейности призмной дисперсии спектральное разрешение измерений на длине волны больше 500 нм падает экспоненциально (Jaross et al., 2014).

Для расширения поля зрения LP имеет три вертикальные щели. Рекомендуется использовать только измерения от центральной щели из-за оставшихся проблем с наведением и рассеянным светом на боковых. Разрешение по вертикали составляет 1 км, а диапазон высот для вертикального профиля аэрозоля — от 5 до 40 км. Горизонтальное разрешение по центральной щели вдоль траектории пролёта — около 50 км. Данные наблюдений, структурированные по суточным файлам, доступны на сайте NASA (https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/OMPS_NPP_LP_L2_AER_DAILY_2). Каждый файл содержит набор коэффициентов экстинкции (мера затухания излучения, представляющая собой сумму рассеяния и поглощения, т. е. суммарное воздействие среды на проходящее через неё излучение) на шести длинах волн: 510, 600, 675, 745, 869 и 997 нм, а также ряд сопутствующих параметров. Для извлечения, сортировки и анализа данных было разработано программное средство в среде MatLab.

Долгопериодная изменчивость

Измерения Suomi NPP позволяют проследить эволюцию региональной аэрозольной нагрузки. Границы исследуемого региона были выбраны на параллелях 40 и 55° с. ш. и меридианах 45 и 85° в. д. соответственно. Суточный вертикальный профиль коэффициентов экстинкции

ции (Ext) в диапазоне высот 5–40 км вычислялся через усреднение профилей, измеренных в точках траекторий, проходящих через регион. Обычно в течение суток одна траектория КА пересекает весь широтный диапазон 40–55° с. ш. полностью, а вторая попадает в регион частично. Это даёт не менее двух десятков измеренных профилей Ext. Чтобы получить среднесуточные значения отдельно стратосферного и тропосферного Ext, вертикальный профиль разделялся на две части по границе, установленной на высоте 15 км. Эта граница проходит несколько выше тропопаузы, высота которой в Казахстане изменяется от ~10 км (январь) до 14 км (июль). Значения Ext в точках, попадающих в стратосферную и тропосферную части профиля, усреднялись отдельно и давали пару соответствующих параметров для стратосферы и тропосферы.

На *рис. 1* представлены временные ряды Ext стратосферного и тропосферного аэрозоля, измеренные на длине волны 869 нм (Ext-869). Этот сигнал был выбран потому, что на спектральный интервал 830–900 нм не влияет полоса поглощения кислорода, которая приходится на большие частоты.

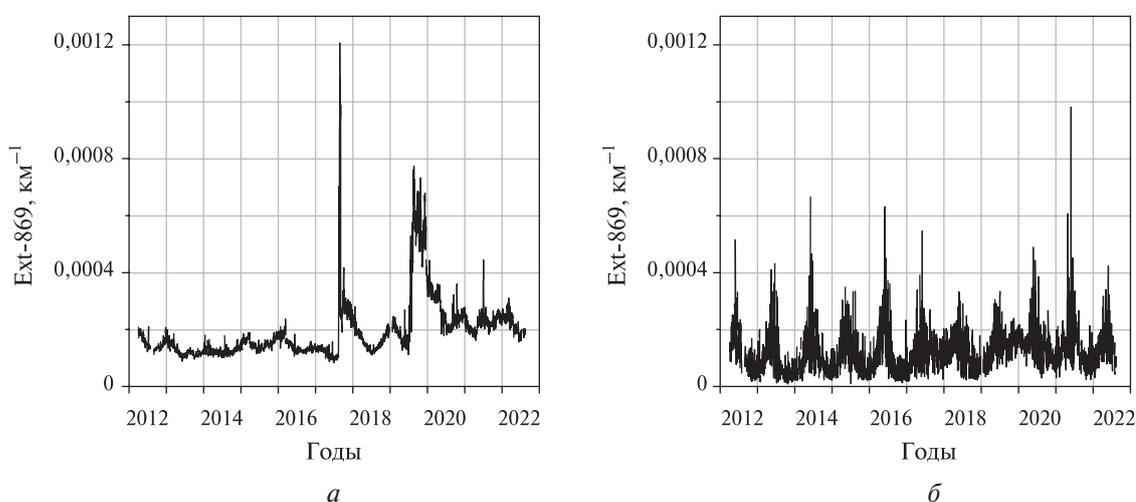


Рис. 1. Среднесуточные значения коэффициента экстинкции на длине волны 869 нм стратосферного (*а*) и тропосферного (*б*) аэрозоля

Рисунок 1а показывает, что до 2017 г. в стратосфере величина Ext-869 не превышала $0,0001 \text{ км}^{-1}$, а межгодовая изменчивость была выражена слабо. Внутри года концентрация незначительно повышалась в холодный сезон. Особая ситуация сложилась летом 2017 г. В августе произошёл резкий выброс аэрозоля, когда величина Ext-869 в течение нескольких дней увеличилась на порядок и затем упала, но до значений, в два раза превышающих обычный фоновый уровень. Повышенная концентрация сохранялась в течение нескольких месяцев и даже следующей зимой. В середине 2019 г. зафиксировано следующее резкое повышение концентрации. Этот пик был ниже, чем в 2017 г., но аномалия была более продолжительной и наблюдалась до середины следующего года. Даже после её релаксации фоновый уровень оставался в 1,5–2 раза выше, чем в начале периода наблюдений в начале 2010-х гг.

В годы стратосферных аномалий некоторое повышение Ext-869 наблюдалось и в тропосфере (см. *рис. 1б*). Здесь общая концентрация аэрозоля больше, чем в стратосфере, значительно изменяется изо дня в день и имеет выраженную сезонную вариацию с минимумом зимой (уровень порядка $0,00005 \text{ км}^{-1}$) и максимумом летом. В летний сезон отмечается не только повышение фонового аэрозоля, но и рост интенсивности суточных пиков. В зимний сезон 2017/2018 гг. и особенно 2019/2020 гг. величина Ext-869 не опускалась до типичного зимнего фонового уровня, а оставалась достаточно высокой (примерно $0,0002 \text{ км}^{-1}$). Однако летних пиков, синхронных со стратосферными повышениями в 2017 и 2019 гг., в тропосфере не является. Это подтверждает тот факт, что тропосферные летние пики имеют иную природу,

чем стратосферные. Наибольшие суточные значения Ext-869 (до $0,0009 \text{ км}^{-1}$) наблюдались летом 2021 г. В исследуемом регионе они могут быть связаны с пыльными бурями.

Аномальные повышения

Более подробный анализ событий аномального повышения концентрации стратосферного аэрозоля с использованием данных зондирования на всех шести длинах волн указывает на существенные различия в свойствах аномально плотных аэрозольных слоёв, образовавшихся в 2017 и 2019 гг. На *рис. 2* представлены значения Ext на зондируемых длинах волн. В 2017 г. (см. *рис. 2а*) в конце августа произошло очень быстрое повышение Ext, которое 30 августа достигло своего максимума в $0,0013 \text{ км}^{-1}$. Слой наблюдался в течение нескольких дней и затем резко исчез. Во время существования слоя значения Ext на всех длинах волн были практически одинаковы, т.е. дисперсия была минимальной. Такая картина характерна для слоёв, состоящих из относительно крупных частиц. В 2019 г. (см. *рис. 2б*) характер изменения Ext совершенно другой. В этом случае образовался долгоживущий слой, который существовал вплоть до зимы. С середины июля значения Ext увеличились на всех длинах волн, причём оставаясь обратно пропорциональными длине волны. Стабильно большая дисперсия свидетельствует о том, что в слое присутствовали различные фракции, большую часть которых составляли частицы малых размеров.

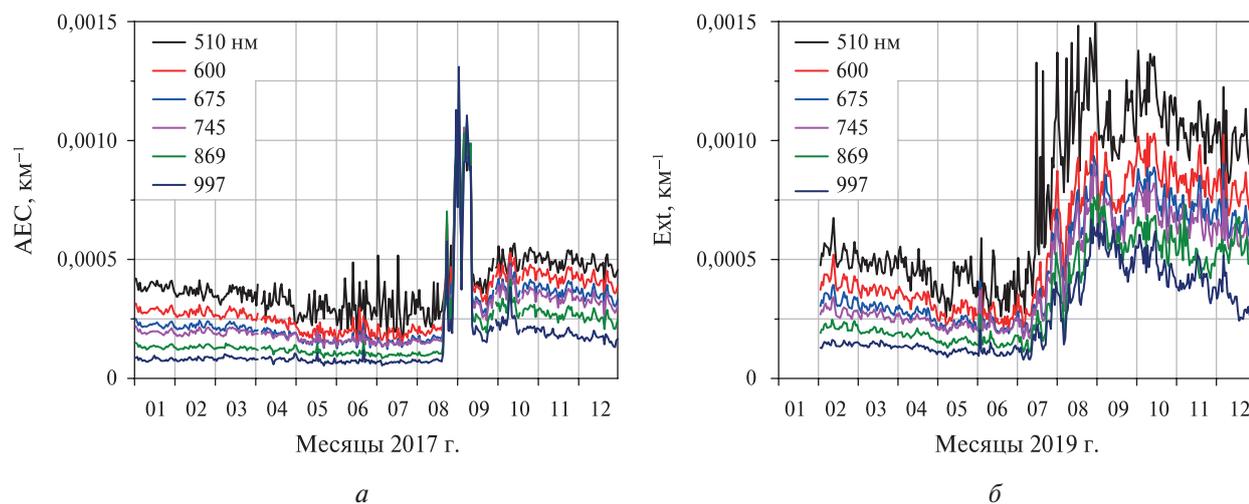


Рис. 2. Коэффициенты экстинкции на шести длинах волн в 2017 г. (*а*) и 2019 г. (*б*)

На *рис. 3* показаны примеры наборов вертикальных профилей Ext-869 в диапазоне высот 10–25 км при пролётах спутника с юга на север через выделенный регион 30 августа 2017 г. (см. *рис. 3а*) и в такую же дату 2019 г. (см. *рис. 3б*). В первом случае выраженный аэрозольный слой наблюдался на высоте 20 км. В этот день траектория пролёта пересекала выбранную географическую область вдоль меридиана между 70 и 75° в.д. В некоторых точках траектории, ближе к северной границе области, величина Ext-869 в максимуме достигала значения $0,006 \text{ км}^{-1}$, т.е. была очень большой даже в сравнении с уровнем, характерным для тропосферы. При этом в профилях, измеренных в тех точках траектории, которые находились в южной части области, повышений не наблюдалось. Такие различия регионального масштаба указывают, что аэрозольный слой был не только плотным, но и, вероятно, локализованным в географически узком канале.

Летом 2019 г. аэрозольный слой регистрировался на значительно меньших высотах, чем в 2017 г. Все профили события 2019 г. обладают выраженным максимумом ($\sim 0,001 \text{ км}^{-1}$) на высоте около 17 км, а часть из них имеет ещё один максимум в нижней стратосфере на высоте

13 км. Верхняя часть этого толстого и стратифицированного слоя распределена относительно равномерно по площади всего региона и, вероятно, распространяется далеко за его пределы.

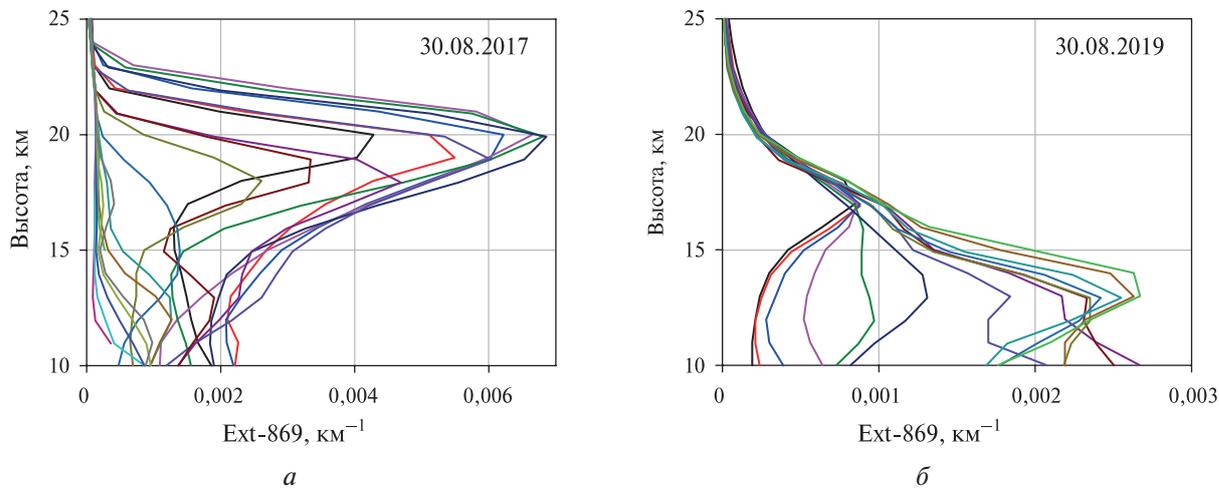


Рис. 3. Вертикальные профили Ext-869 30 августа 2017 г. (а) и 2019 г. (б)

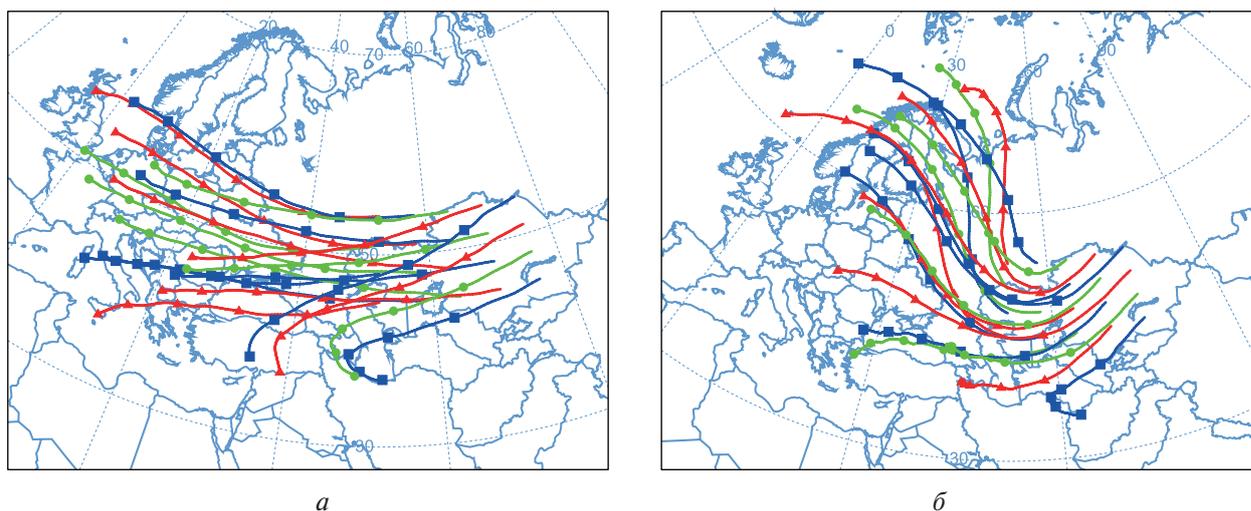


Рис. 4. Семидневные обратные траектории движения воздушных масс из региона Казахстана 30 августа 2017 г. (а) и 2019 г. (б)

Время жизни аэрозольных частиц в стратосфере (в основном сульфатов) увеличивается с высотой и в среднем составляет порядка одного года. За исключением каких-либо особенных случаев локальных выбросов источником появления плотных слоёв в определённом регионе представляется перенос частиц от места извержения вулканов или поднятия продуктов горения выше тропопаузы в стратосферу, где они общим движением воздушных масс распространяются на дальние расстояния по всему полушарию. Кроме того, возможны и случаи появления стратосферных аэрозольных слоёв, которые связаны с антропогенным воздействием (например, стартами ракет) или вторжением болидов в атмосферу. Для выявления источника наблюдаемых аномальных аэрозольных слоёв в случае дальнего переноса обычно применяется обратное трассирование с помощью моделей, основанных на метеоданных. Одним из средств, обеспечивающих эту процедуру, выступает модель NOAA (*англ.* National Oceanic and Atmospheric Administration — Национальное управление океанических и атмосферных исследований, США) HYSPLIT (*англ.* Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model), которая доступна через интернет-ресурс https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT_traj.php и по-

зволяет проводить онлайн-расчёт вперёд и назад по времени в диапазоне 15 дней. Заметим, что временной масштаб трассировки много меньше, чем время жизни аэрозоля в стратосфере, однако соответствует скорости ветрового переноса. Увеличение временного отрезка трассировки приводит к удлинению обратной траектории, но при этом растёт и неопределённость начальных точек.

На *рис. 4* (см. с. 233) показаны ансамбли 7-дневных обратных траекторий движения воздушных масс на высоте 18 км. Эти частицы воздуха пришли к конечным точкам в исследуемом регионе в дату 30 августа в 2017 г. (см. *рис. 4а*) и 2019 г. (см. *рис. 4б*). Модель демонстрирует превалирующие особенности циркуляции, которая в летний сезон достаточно устойчива. Построенные траектории показали, что в 2017 г. преобладал зональный перенос и основные воздушные массы были принесены из районов Атлантики. В 2019 г. перенос имел заметную меридиональную компоненту и значительная часть воздушных масс поступала из Арктики. Таким образом, если два события регионального повышения стратосферного аэрозоля были вызваны дальним переносом, то направление этого переноса было принципиально разным.

Обсуждение результатов

Установившееся после 2012 г. фоновое состояние аэрозольного наполнения стратосферы над регионом Казахстана в летний сезон 2017 и 2019 гг. было нарушено появлением плотных слоёв, которые существенно различались по своим свойствам. В середине июля 2019 г. ветровой перенос воздушных масс из полярных широт являлся основным фактором появления долгоживущего аэрозольного слоя в стратосфере над Казахстаном. Спектральные характеристики, измеренные КА Suomi NPP при пролётах над регионом, указывают на то, что слой, вероятно, состоял из продуктов горения (сажи), вынесенных за счёт пироконвективного эффекта на высоты нижней стратосферы, где обычно преобладают жидкие сульфатные аэрозоли. Размер частиц сажи, которые могут находиться в нижней стратосфере в течение месяцев, составляет порядка 0,3 мкм или больше (Murphy et al., 2007). Присутствие мелких сажевых частиц проявляется в большой волновой дисперсии параметра Ext, измеренного на разных длинах волн, и в большей экстинкции в диапазоне более коротких волн. Соотношение Ext на разных длинах волн в фоновом аэрозоле и в потоке, транспортированном с севера, остаётся одинаковым. Это свидетельствует в пользу того, что в образовании аномального стратосферного слоя участвовал чёрный углерод, связанный с пожарами.

Летом 2019 г. самые мощные лесные пожары в северном полушарии происходили в Сибири, к востоку от Казахстана. Смог распространялся с запада на восток к оз. Байкал, в Центральную и Восточную Сибирь. Однако в стратосферу Казахстана сажевый аэрозоль попал с северного направления. Механизм дальнего переноса может быть следующим. Благодаря возникновению пирокумулятивных облаков продукты горения проникают через тропопаузу в нижнюю стратосферу. Действительно, стратосферный аэрозоль сибирских лесных пожаров наблюдался лидаром в Томске (Маричев и др., 2022; Черемисин и др., 2021). Учитывая меридиональный перенос воздушных масс над Европой (см. *рис. 4б*), чтобы быть обнаруженными в стратосфере над Казахстаном, продукты горения должны быть сначала подняты на большую высоту. Подъём частиц может происходить согласно механизму солнечного нагрева, предложенному в работе (de Laat et al., 2012). Затем частицы должны быть перенесены в полярные широты. Учитывая, что обычно превалирует зональный поток с запада на восток, ситуация, когда сажевый аэрозоль достигает полярных широт, возможна только при усилении циркуляции Брюера–Добсона. Слой стратосферного пироаэрозоля действительно был обнаружен в высокоширотной Арктике во время лидарного зондирования с борта ледокола Polarstern во время международной полярной экспедиции MOSAiC (*англ.* Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate) (Ohneiser et al., 2021) в зимнее полугодие 2019–2020 гг. Авторы показали, что наблюдаемый слой связан именно с сильными и продолжительными лесными пожарами в Сибири в июле–августе 2019 г. Возрастание в эти же месяцы сажевого аэрозоля в стратосфере над Казахстаном показывает,

что образовавшиеся стратосферные слои быстро покрыли большую часть Северного полушария и оставались там достаточно долго.

Формирование экстремально плотного, но на этот раз короткоживущего (несколько дней) стратосферного слоя в августе 2017 г. также можно было бы считать эффектом переноса сажевого аэрозоля. Действительно, в северной Америке в течение августа этого года бушевали мощные лесные пожары. За счёт пироконвективного эффекта они привели к поднятию продуктов горения в стратосферу, где они общим движением воздушных масс распространились с запада на восток по Северному полушарию. В Канаде над зоной горения КА Suomi NPP зафиксировал рекордное значение аэрозольного индекса — почти 50. Такое большое значение указывает на то, что дымовой шлейф возвышался над тропопаузой и мог попасть в полярное струйное течение. Последствия лесных пожаров в Канаде регистрировались в стратосфере над Европой, в частности на лидарной обсерватории во Франции, где на высоте 19 км в августе — сентябре наблюдались отдельные аэрозольные слои с обратным рассеянием, достигающим беспрецедентно высоких значений для невулканического аэрозоля (Khaykin et al., 2018). Можно предположить, что отдельный длинный и узкий стратосферный стример мог донести аэрозольные частицы и до Азии.

Однако если аномальные слои и в 2017, и в 2019 гг. стали следствием выноса продуктов горения в стратосферу и последующего дальнего переноса, то остаётся неясным, чем обусловлены различия между их характеристиками. Особенно необычным оказывается образовавшийся в 2017 г. тонкий, плотный, высокий, быстро появившийся и исчезнувший слой. В нём измеренная экстинкция оказывается практически одинаковой на всех длинах волн. Это предполагает наличие крупных частиц, но вряд ли такие частицы могут переноситься на большие расстояния. Возможно, эффект связан с неправильной формой частиц дымового аэрозоля, что влияет на результаты зондирования. Также нельзя исключить тот факт, что природа этого слоя не связана с канадскими пожарами, а имеет какой-то локальный источник. Эти вопросы требуют дополнительного анализа с привлечением более широкого спектра данных.

Заключение

В статье прослеживается эволюция аэрозоля в стратосфере над регионом Казахстана в 2012–2021 гг. и рассматривается роль дальнего переноса в формировании аномалий. Анализ коэффициентов экстинкции, полученных с помощью лимбового зондировщика на борту КА Suomi NPP, показал, что установившееся после 2012 г. фоновое состояние аэрозольного наполнения стратосферы было нарушено появлением слоёв повышенной плотности в летний сезон 2017 и 2019 гг. Слой, внезапно возникший в августе 2017 г., был короткоживущим (несколько дней), но очень плотным, высоким (20 км) и состоял из относительно крупных частиц. Появление слоя могло быть связано с узким высотным струйным течением, посредством которого осуществлялся межконтинентальный перенос сажевого продукта, образовавшегося во время лесных пожаров в северной Америке. Однако уникальность характеристик этого слоя может быть обусловлена и другими, пока неясными причинами.

Наблюдаемый в течение года относительно толстый слой мелкодисперсного аэрозоля, образовавшийся в июле 2019 г., сформировался из поднявшихся в нижнюю стратосферу продуктов горения во время сибирских пожаров и распространился на Казахстан через первоначальный быстрый вынос в Арктику и последующий меридиональный перенос в южном направлении.

Результаты показывают, что бореальные лесные пожары могут оказать длительное воздействие на стратосферную аэрозольную нагрузку, аналогичное умеренному извержению вулканов в масштабе всего полушария, и обнаруживаться локально на большом удалении от источника. При этом частицы дыма с большой долей чёрного углерода обладают гораздо большей поглощающей способностью солнечного излучения, чем частицы серы, характерные для вулканического пепла.

В целом фоновый уровень стратосферного аэрозоля после 2017 г. оставался в 1,5–2 раза выше, чем в начале периода наблюдений.

Литература

1. *Маричев В. Н., Бочковский Д. А., Елизаров А. И.* Оптические характеристики стратосферного аэрозоля Западной Сибири по результатам лидарного мониторинга в 2010–2021 гг. // *Оптика атмосферы и океана.* 2022. Т. 35. № 9. С. 717–721. DOI: 10.15372/AOO20220904.
2. *Черемисин А. А., Маричев В. Н., Бочковский Д. А., Новиков П. В., Романченко И. И.* Стратосферный аэрозоль сибирских лесных пожаров по данным лидарных наблюдений в Томске в августе 2019 г. // *Оптика атмосферы и океана.* 2021. Т. 34. № 11. С. 898–905. DOI: 10.15372/AOO20211110.
3. *de Laat A. T. J., Stein Zweers D. C., Boers R., Tuinder O. N. E.* A solar escalator: Observational evidence of the self-lifting of smoke and aerosols by absorption of solar radiation in the February 2009 Australian Black Saturday plume // *J. Geophysical Research: Atmosphere.* 2012. V. 117. Art. No. D04204. <https://doi.org/10.1029/2011JD017016>.
4. *Jaross G., Bhartia P. K., Chen G., Kowitt M., Haken M., Chen Z., Xu P., Warner J., Kelly T.* OMPS Limb Profiler instrument performance assessment // *J. Geophysical Research: Atmosphere.* 2014. V. 119. P. 4399–4412. <https://doi.org/10.1002/2013JD020482>.
5. *Junge C. E., Chagnon C. W., Manson J. E.* Stratospheric aerosols // *J. Atmospheric Sciences.* 1961. V. 18. Iss. 1. P. 81–108. DOI: 10.1175/1520-0469(1961)018<0081:SA>2.0.CO;2.
6. *Khaykin S. M., Godin-Beekmann S., Hauchecorne A., Pelon J., Ravetta F., Keckhut P.* Stratospheric smoke with unprecedentedly high backscatter observed by lidars above southern France // *Geophysical Research Letters.* 2018. V. 45. P. 1639–1646. DOI: 10.1002/2017GL076763.
7. *Koch D., Hansen J.* Distant origins of Arctic black carbon: A Goddard Institute for Space Studies ModelE experiment // *J. Geophysical Research.* 2005. V. 110. Art. No. D04204. DOI: 10.1029/2004JD005296.
8. *Kremser S., Thomason L. W., von Hobe M., Hermann M., Deshler T. et al.* Stratospheric Aerosol — Observations, processes, and impact on climate // *Review Geophysics.* 2016. V. 54. P. 278–335. DOI: 10.1002/2015RG000511.
9. *Murphy D. M., Cziczo D. J., Hudson P. K., Thomson D. S.* Carbonaceous material in aerosol particles in the lower stratosphere and tropopause region // *J. Geophysical Research.* 2007. V. 112. Art. No. D04203. DOI: 10.1029/2006JD007297.
10. *Ohneiser K., Ansmann A., Chudnovsky A., Engelmann R., Ritter C., Veselovskii I., Baars H., Gebauer H., Griesche H., Radenz M., Hofer J., Althausen D., Dahlke S., Maturilli M.* The unexpected smoke layer in the High Arctic winter stratosphere during MOSAiC 2019–2020 // *Atmospheric Chemistry Physics.* 2021. V. 21. P. 15783–15808. <https://doi.org/10.5194/acp-21-15783-2021>.
11. Spreading like Wildfire: The Rising Threat of Extraordinary Landscape Fires. A UNEP Rapid Response Assessment. United Nations Environment Programme. Nairobi, 2022. 126 p. <https://www.unep.org/resources/report/spreading-wildfire-rising-threat-extraordinary-landscape-fires> (accessed 17.09.2022).
12. *Yu P., Rosenlof K. H., Liu S., Telg H., Thornberry T. D., Rollins A. W., Portmann R. W., Bai Z., Ray E. A., Duan Y., Pan L. L., Toon O. B., Bian J., Ru-Shan Gao R.-S.* Efficient transport of tropospheric aerosol into the stratosphere via the Asian summer monsoon anticyclone // *Earth, Atmospheric and Planetary Sciences.* 2017. V. 114(27). P. 6972–6977. <https://doi.org/10.1073/pnas.1701170114>.

Stratospheric aerosol over the region of Kazakhstan according to Suomi NPP satellite observations

R. Yu. Lukianova

*Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: renata@aari.ru*

The evolution of stratospheric aerosol over the region of Kazakhstan in 2012–2021 is considered based on vertical profiles obtained with the Suomi NPP limb sounder. An analysis of the variability of the daily averaged extinction coefficients showed that the background state of the stratospheric aerosol

load, which had been established after 2012, was disturbed by the appearance in the summer of 2017 of a short-lived, and in the summer of 2019, a long-lived layer of increased density. Formation of the layers may be related to the long-distance transport of combustion products by high-altitude jet streams during boreal fires. The appearance of the layer in year 2017 may be associated with a narrow high-altitude jet stream, through which the intercontinental transfer of the soot product formed during boreal fires in North America was carried out. However, the layer found over Kazakhstan consisted of large particles that are unlikely to be transported over long distances. The relatively thick layer of finely dispersed aerosol, which formed in July 2019, was observed till the next summer. This layer was clearly formed from the combustion products that rose into the lower stratosphere during the Siberian fires and spread to Kazakhstan through the initial rapid transport to the Arctic and subsequent meridional transport to the south. In general, the background level of stratospheric aerosol in the region after year 2017 increased 1.5–2 times compared to the beginning of the observation period.

Keywords: stratosphere, aerosol, satellite observations, vertical profile, long-distance transport

Accepted: 16.03.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-229-237

References

1. Marichev V.N., Bochkovsky D.A., Elizarov A., Optical-aerosol model of the Western Siberian stratosphere based on lidar monitoring results, *Optika atmosfery i okeana*, 2022, Vol. 35, No. 9, pp. 717–721 (in Russian), DOI: 10.15372/AOO20220904.
2. Cheremisin A.A., Marichev V.N., Bochkovskii D.A., Novikov P.V., Romanchenko I.I., Stratospheric Aerosol of Siberian Forest Fires According to Lidar Observations in Tomsk in August 2019, *Atmospheric and Ocean Optics*, 2022, Vol. 35, pp. 57–64, <https://doi.org/10.1134/S1024856022010043>.
3. de Laat A.T.J., Stein Zweers D.C., Boers R., Tuinder O.N.E., A solar escalator: Observational evidence of the self-lifting of smoke and aerosols by absorption of solar radiation in the February 2009 Australian Black Saturday plume, *J. Geophysical Research: Atmosphere*, 2012, Vol. 117, Art. No. D04204, <https://doi.org/10.1029/2011JD017016>.
4. Jaross G., Bhartia P.K., Chen G., Kowitt M., Haken M., Chen Z., Xu P., Warner J., Kelly T., OMPS Limb Profiler instrument performance assessment, *J. Geophysical Research: Atmosphere*, 2014, Vol. 119, pp. 4399–4412, <https://doi.org/10.1002/2013JD020482>.
5. Junge C.E., Chagnon C.W., Manson J.E., Stratospheric aerosols, *J. Atmospheric Sciences*, 1961, Vol. 18, Issue 1, pp. 81–108, DOI: 10.1175/1520-0469(1961)018<0081:SA>2.0.CO;2.
6. Khaykin S.M., Godin-Beekmann S., Hauchecorne A., Pelon J., Ravetta F., Keckhut P., Stratospheric smoke with unprecedentedly high backscatter observed by lidars above southern France, *Geophysical Research Letters*, 2018, Vol. 45, pp. 1639–1646, <https://doi.org/10.1002/2017GL076763>.
7. Koch D., Hansen J., Distant origins of Arctic black carbon: A Goddard Institute for Space Studies ModelE experiment, *J. Geophysical Research*, 2005, Vol. 110, Art. No. D04204, DOI: 10.1029/2004JD005296.
8. Kremser S., Thomason L.W., von Hobe M., Hermann M., Deshler T. et al., Stratospheric Aerosol — Observations, processes, and impact on climate, *Review Geophysics*, 2016, Vol. 54, pp. 278–335, DOI: 10.1002/2015RG000511.
9. Murphy D.M., Cziczko D.J., Hudson P.K., Thomson D.S., Carbonaceous material in aerosol particles in the lower stratosphere and tropopause region, *J. Geophysical Research*, 2007, Vol. 112, Art. No. D04203, DOI: 10.1029/2006JD007297.
10. Ohneiser K., Ansmann A., Chudnovsky A., Engelmann R., Ritter C., Veselovskii I., Baars H., Gebauer H., Griesche H., Radenz M., Hofer J., Althausen D., Dahlke S., Maturilli M., The unexpected smoke layer in the High Arctic winter stratosphere during MOSAiC 2019–2020, *Atmospheric Chemistry Physics*, 2021, Vol. 21, pp. 15783–15808, <https://doi.org/10.5194/acp-21-15783-2021>.
11. *Spreading like Wildfire: The Rising Threat of Extraordinary Landscape Fires, A UNEP Rapid Response Assessment*, United Nations Environment Programme, Nairobi, 2022, 126 p., <https://www.unep.org/resources/report/spreading-wildfire-rising-threat-extraordinary-landscape-fires> (accessed 17.09.2022).
12. Yu P., Rosenlof K.H., Liu S., Telg H., Thornberry T.D., Rollins A.W., Portmann R.W., Bai Z., Ray E.A., Duan Y., Pan L.L., Toon O.B., Bian J., Ru-Shan Gao R.-S., Efficient transport of tropospheric aerosol into the stratosphere via the Asian summer monsoon anticyclone, *Earth, Atmospheric and Planetary Sciences*, 2017, Vol. 114(27), pp. 6972–6977, <https://doi.org/10.1073/pnas.1701170114>.