

УДК 551.510.42

## Стратосферный аэрозоль от лесных пожаров в Сибири по данным лидарных и спутниковых наблюдений в июле 2022 г.

И.И. Романченко<sup>1,2</sup>, А.А. Черемисин<sup>✉1</sup>, П.В. Новиков<sup>3</sup>,  
В.Н. Маричев<sup>4</sup>, Д.А. Бочковский<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН  
630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 3

<sup>2</sup>Новосибирский государственный технический университет  
630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20

<sup>3</sup>Красноярский институт железнодорожного транспорта  
660028, г. Красноярск, ул. Новая Заря, 2и

<sup>4</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 24.07.2025;  
после доработки 26.08.2025;  
принята к печати 24.10.2025

Сажевый аэрозоль от лесных пожаров, инжектируемый в стратосферу, может влиять на климат в планетарном масштабе наравне с вулканическим аэрозолем. В данной работе изучалось наполнение стратосферы сажевым аэрозолем от лесных пожаров в Восточной Сибири, а также появление вулканического аэрозоля над Западной Сибирью. Рассмотрен эпизод наземных лидарных наблюдений в июле 2022 г., когда в стратосфере над Томском были обнаружены аэрозольные слои на высотах около 11 и 20–25 км. Анализируется происхождение этих слоев с помощью метода траекторий движения воздушных масс с контролем их наполнения аэрозолем по данным лидара спутника CALIPSO, а также с привлечением данных зондирования атмосферы и поверхности Земли со спутников Suomi-NPP и Himawari-8. Показано, что источниками аэрозольного наполнения нижней стратосферы на высоте около 11 км являются пожары в Восточной Сибири, которые привели к образованию мощных пирокумулятивных облаков; установлено место и время образования этих облаков. Показано, что аэрозольные слои на высотах 20–25 км связаны с извержением вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай, который извергался в Южном полушарии в январе 2022 г. Полученные результаты представляют значительный интерес для прогнозирования климатических изменений в региональном и глобальном масштабах.

*Ключевые слова:* стратосфера, пирокумулятивное облако, сажевый аэрозоль, вулканический аэрозоль, траекторный анализ, спутниковое зондирование, лидар; stratosphere, pyrocumulonimbus cloud, soot aerosol, volcanic aerosol, trajectory analysis, satellite sounding, lidar.

### Введение

Аэрозоль стратосферы играет важную роль во многих физико-химических атмосферных процессах, а также в формировании климата планеты. В настоящее время установлено, что значительный вклад в стратосферное наполнение вносят аэрозоли сульфатного происхождения, которые формируются после мощных извержений вулканов. Известно также, что в стратосфере присутствует сажевый аэро-

золь, который попадает в нее в результате работы авиационных двигателей [1]. С помощью космических систем мониторинга атмосферы было обнаружено, что мощным источником сажевого аэрозоля в стратосфере являются лесные пожары [2]. Интенсивные пожары могут вызвать образование мощных пирокумулятивных облаков (PycCb), которые способны инжектировать аэрозоли горения в нижнюю стратосферу.

Пирокумулятивное облако — это кучевое или кучево-дождевое облако, которое развивается в результате вертикальной конвекции, вызванной пожаром, которая в своем крайнем проявлении обеспечивает проникновение продуктов горения через тропопаузу в нижнюю стратосферу [2]. Случаи пирокумулятивных инъекций в стратосферу зафиксированы в Канаде, США [2–4] и Австралии [5].

\* Илья Игоревич Романченко (ilya-romanchenko@mail.ru); Александр Алексеевич Черемисин (aacheremisn@gmail.com); Павел Вадимович Новиков (novikov-pv@yandex.ru); Валерий Николаевич Маричев (marichev@iao.ru); Дмитрий Андреевич Бочковский (moto@iao.ru).

Сажевый аэрозоль, инжектируемый RuгоСb, регистрировался далеко от точек инъекции. Например, такой аэрозоль, образовавшийся в Канаде 11–12.08.2017 г. [3, 6], был обнаружен над Центральной и Южной Европой. Причем коэффициент экстинкции был на порядок выше, чем после извержения вулкана Пинатубо в июне 1991 г. [3]. Результаты целого ряда наблюдений стратосферного аэрозоля, которые ранее интерпретировались как регистрация слоев вулканического аэрозоля от Пинатубо в 1991 г., пересмотрены в пользу того, что наблюдался сажевый аэрозоль от лесных пожаров [2, 7].

Случаи пирокумулятивной инъекции сажевого аэрозоля в стратосферу в Канаде, США и Австралии описаны во многих работах, например подъем сажи в стратосферу [3, 8] за счет механизмов самоподъема [9] или гравитофотофореза [10]. Между тем пирокумулятивная инъекция сажи в стратосферу из-за обширных лесных пожаров в Сибири является дискуссионным вопросом. Например, по результатам наблюдений стратосферы в Европе в августе 2019 г. с помощью рамановских лидаров, а также Фурье-спектрометра на спутнике АСЕ высказаны два противоположных мнения: что наблюдался сажевый аэрозоль от пожаров в Сибири [6, 11] или сульфатный аэрозоль от извержения вулкана Райкоке, которое произошло в июне 2019 г. [12].

В нашей предыдущей статье [13] было проведено исследование происхождения аэрозольных слоев, зарегистрированных в нижней стратосфере в августе 2019 г. с помощью лидара на Сибирской лидарной станции (СЛС) Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН в Томске. Рассматривался случай переноса аэрозоля горения в стратосфере летом 2019 г., когда в Сибири, Канаде и на Аляске фиксировались многочисленные лесные пожары, а также произошло извержение вулкана Райкоке в июне 2019 г. Анализ обратных траекторий движения воздушных масс, рассчитанных в пакете HYSPLIT по данным GDAS о скоростях ветра с привлечением спутниковой радиометрической информации о пожарах и данных лидара спутника CALIPSO, позволил сделать вывод о том, что наблюдаемые аэрозольные слои – результат RuгоСb-инъекции в стратосферу сажевого аэрозоля лесных пожаров в Восточной Сибири.

Цель настоящей работы – исследование появления сажевого и вулканического аэрозолей в стратосфере Северного полушария на основе анализа происхождения аэрозольных слоев, наблюдавшихся на наземной лидарной станции в стратосфере над Томском в июле 2022 г. на высотах около 11 и 20–25 км.

## Материалы и методы

Идентификация происхождения аэрозольных слоев, наблюдавшихся над Томском с помощью наземного лидара в июле 2022 г., осложнялась тем, что вклад в аэрозольное наполнение стратосферы могли внести лесные пожары в Канаде, США и Си-

бири, а также мощное извержение подводного вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай (далее Хунга-Тонга) в январе 2022 г. За счет высокого давления в стволе вулкана продукты извержения преодолели гидростатическое давление 150-метровой толщи воды, и, по некоторым оценкам, достигли высот от 40 до 58 км н.у.м. [14]. В течение нескольких месяцев вулканический аэрозоль перемещался из Южного в Северное полушарие, где его зафиксировали в Китае [15].

В работе использовались данные наземной лидарной стратосферной станции в Томске, космического лидара CALIOP на спутнике CALIPSO, радиометров системы VIIRS на спутнике Suomi-NPP, данные визуальных наблюдений и данные о яркостной температуре вершин облаков и поверхности земли со спутника Himawari-8, а также результаты траекторного анализа с привлечением данных по скоростям ветра GDAS.

Лидарные наземные наблюдения проводились в ночное время на СЛС ИОА СО РАН в Томске. Измерения осуществлялись методом упругого рассеяния на длине волны лазерного излучения  $\lambda = 532$  нм. Основные технические характеристики лидарного комплекса: энергия в импульсе 400 мДж, длина строба 192 м, частота следования импульсов 10 Гц, диаметр приемного зеркала 1 м, регистрация – в режиме счета фотонов [16].

Аэрозольная стратификация атмосферы характеризуется отношением обратного рассеяния

$$R(H) = (\beta_{pm}(H) + \beta_{pa}(H)) / \beta_{pm}(H), \quad (1)$$

где  $\beta_{pm}(H)$ ,  $\beta_{pa}(H)$  – объемные коэффициенты молекулярного и аэрозольного обратного рассеяния света на высоте  $H$ . Отношение обратного рассеяния позволяет зафиксировать аэрозоль в атмосфере: при его наличии на некоторой высоте  $R(H) > 1$ , при его отсутствии  $R(H) \approx 1$  с точностью до погрешности измерений.

Высотное распределение аэрозоля также изучалось по данным облачно-аэрозольного лидара CALIOP на спутнике CALIPSO [17]. Система обработки данных этого лидара автоматически классифицирует аэрозоль по интегральному обратному рассеянию, отношению деполяризации и цветовому отношению [18]. Географическое положение пожаров и их интенсивность определялись по данным комплекса радиометров VIIRS, которые работают в видимом и инфракрасном диапазонах. Они размещены на борту спутника Suomi-NPP. Данные VIIRS позволяют ежедневно отслеживать положение пожаров с минимальной площадью  $375 \times 375$  м [19].

Для поиска пирокумулятивных выбросов использовались данные спутника Himawari-8, принадлежащего Японскому метеорологическому агентству [20]. На спутнике установлена многоволновая камера, которая содержит 16 спектральных каналов с длинами волн от 0,43 до 13,4 мкм и пространственным разрешением от 0,5 км в видимом диапазоне до 2 км в инфракрасном. Использовались цветные

фотоизображения для визуального поиска PuroCb, данные 3-го канала на  $\lambda = 0,64$  мкм, а также данные по яркостной температуре вершин облаков и подстилающей поверхности 11-го канала на  $\lambda = 8,6$  мкм.

## Результаты и обсуждение

### Перенос сажевого аэрозоля в стратосфере летом 2022 г.

В результате наземных лидарных наблюдений в стратосфере над Томском 7–12.07.2022 г. были зарегистрированы аэрозольные пики на высоте 10–12 км с отношением обратного рассеяния  $R \approx 1,2$  и диффузный слой с  $R \approx 1,1$  в диапазоне высот 20–25 км (рис. 1; на врезке в левом нижнем углу пики помечены как P, Q, U, V1–V5; пики, зарегистрированные в 2019 г., помечены на такой же врезке на рис. 2 как A, B, C, D, F, G, V1–V3).

В 2022 г. источниками аэрозоля могли быть пожары в Канаде, США, Восточной Сибири, а также извержение вулкана Хунга-Тонга. Аналогичная ситуация наблюдалась и в 2019 г., когда в стратосфере над Томском были зафиксированы аэрозольные слои на высотах от 10 до 17 км, а пожары в тех же регионах сопровождалась извержением вулкана Райкоке. Для анализа происхождения аэрозольных слоев в 2022 г. была использована та же методика, которая ранее применялась для случая 2019 г. [13]. Она позволила выявить, что наблюдавшиеся в нижней стратосфере аэрозольные слои возникли в результате пожаров в Восточной Сибири.

На рис. 1 представлена картина переноса воздушной массы, пришедшей в Томск на высоте 11 км 8.07.2022 г., что соответствует максимуму наблюдавшегося пика аэрозольного рассеяния P. Треки спутника CALIPSO, пересекавшие траекторию переноса, помечены как P1–P5 в хронологическом порядке. Для сопоставления приведена картина переноса воздушной массы, пришедшей в Томск на высоте пика D 13.08.2019 г. (рис. 2), где треки

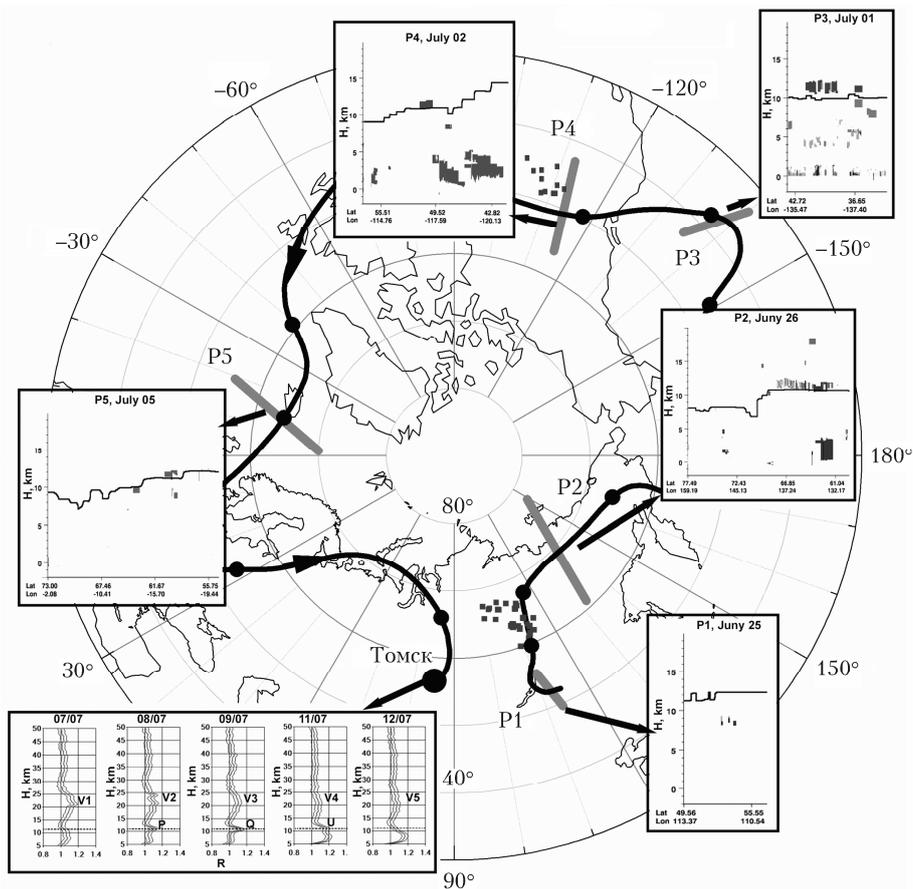


Рис. 1. Наземные и спутниковые лидарные наблюдения аэрозоля в стратосфере Северного полушария вдоль траектории движения воздушной массы, пришедшей в Томск 8.07.2022 г. на высоте 11 км: врезка внизу слева – высотные профили отношения обратного рассеяния  $R$  по данным наземного лидара в Томске в июле 2022 г., пики помечены латинскими буквами, высота тропопаузы – пунктиром; врезки P1–P5 – профили аэрозоля, классифицированного по типам, по данным лидара CALIPSO вдоль треков спутника, изображенных на карте полужирными светло-серыми отрезками, черной линией показана высота тропопаузы; точки на траектории показывают положение воздушных масс в 12:00 UTC в каждые сутки; светло-серые точки на карте показывают координаты пожаров, наблюдаемых в районе прохождения воздушных масс по данным спутникового прибора VIIRS; стрелки на траектории показывают направление движения воздушных масс

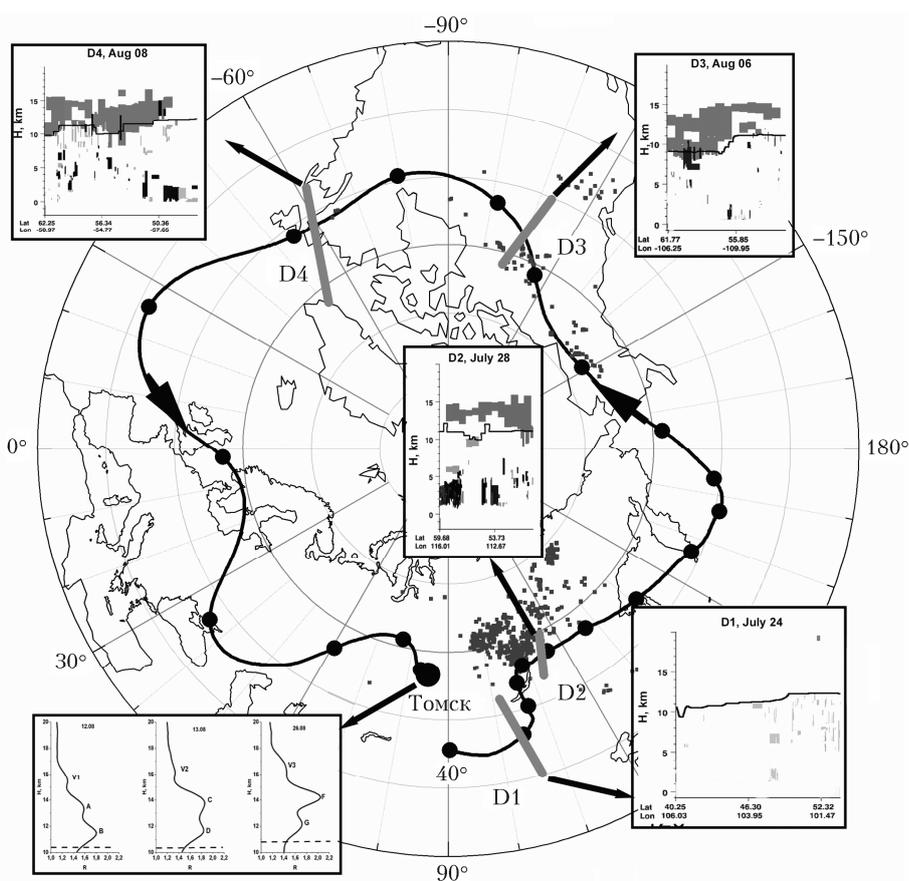


Рис. 2. Наземные и спутниковые лидарные наблюдения аэрозоля в стратосфере Северного полушария вдоль траектории движения воздушной массы, пришедшей в Томск 13.08.2019 г. на высоте 12 км: врезка внизу слева — высотные профили отношения обратного рассеяния  $R$  по данным наземного лидара в Томске в августе 2019 г., пики помечены латинскими буквами, высота тропопазузы — пунктиром; врезки D1–D4 — профили аэрозоля, классифицированного по типам, по данным лидара CALIPSO вдоль треков спутника, изображенных на карте полужирными светло-серыми отрезками. Остальные обозначения такие же, как и на рис. 1

CALIPSO помечены как D1–D4 соответственно. Таким образом, представлены два случая использования методики, когда в одном наблюдавшемся аэрозольные слои были достаточно мощными, как в 2019 г., а в другом, в 2022 г., — сравнительно слабыми.

В обоих случаях обратные траектории движения воздушных масс прошли над территориями пожаров в Восточной Сибири и Канаде. Привлечение данных спутникового лидара CALIPSO позволило проследить наличие аэрозоля в воздушной массе при ее перемещении по рассчитанной траектории и установить географическую область, где произошло ее наполнение аэрозолем. На рис. 1 и 2 толстыми светло-серыми линиями показаны треки спутника CALIPSO, пересекающие траекторию движения воздушной массы, для которых обеспечивалась синхронность появления спутника и рассматриваемой воздушной массы с погрешностью, не превышающей суток. Спутниковое лидарное зондирование в окрестности точек пересечения с траекторией позволило оценить наполнение воздушной массы аэрозолем.

Высотные профили данных лидара спутника CALIPSO вдоль треков спутника с указанием гео-

графических координат и даты представлены на врезках рис. 1 и 2. Для отрисовки использована редуцированная классификация подтипов аэрозоля по версии 4.51 для CALIPSO [20]. Темно-серым цветом показан стратосферный аэрозоль, черным обозначен аэрозоль горения, загрязненный континентальный аэрозоль и загрязненная пыль, светло-серым — остальные подтипы аэрозоля. На рис. 1 и 2 также отмечено положение пожаров, зарегистрированных системой VIIRS, расположенной на спутнике Suomi-NPP. Пожары наносились на карту вдоль траектории движения воздушной массы в полосе шириной примерно 1000 км с учетом времени прохождения воздушной массы.

Согласно представленным на рис. 2 высотным разрезам аэрозольного наполнения стратосферы по данным лидара CALIPSO в 2019 г. вдоль треков D1–D5, синхронно пересекающих траекторию движения воздушной массы, наполнение аэрозолем произошло на участке траектории между разрезами D1 и D2, где траектория проходила над пожарами в Восточной Сибири. В ряду высотных разрезов аэрозольного наполнения стратосферы по данным лидара CALIPSO в 2022 г. вдоль треков P1–P5 (рис. 1)

наполнение аэрозолем произошло на участке траектории между разрезами P1 и P2, что также указывает на пожары в Восточной Сибири как источник аэрозольного наполнения.

Аэрозоль, появившийся над районом пожаров в Восточной Сибири, классифицируется системой CALIPSO в основном как стратосферный, который включает такие подтипы, как сульфатный аэрозоль, вулканический пепел, а также некий неклассифицированный аэрозоль и полярные стратосферные облака. Полярных стратосферных облаков в данной ситуации нет, а над районами пожаров должна была произойти инъекция в стратосферу сажевого аэрозоля. Это подтверждает мнение, высказанное в работе [8], что спутниковый лидар ошибочно может классифицировать сажевый аэрозоль как сульфатный. Таким образом, в обоих случаях, представленных на рис. 1 и 2, в стратосфере над Томском наблюдался сажевый аэрозоль от пожаров Восточной Сибири.

В целом анализ показал, что пики аэрозольного рассеяния A–G, зарегистрированные над Томском в 2019 г. на высотах от 10 до 15 км, а также пики P, Q, U, зарегистрированные в 2022 г. на высоте около 12 км, возникли из-за пожаров в Восточной Сибири. Пики V1–V3 в 2019 г. связаны с извержением вулкана Райкоке, а пики V1–V5 в 2022 г. — с извержением вулкана Хунга-Тонга.

### **Распространение аэрозоля от вулкана Хунга-Тонга в Северном полушарии**

Мощное извержение подводного вулкана Хунга-Тонга произошло в январе 2022 г. в Южном полушарии. Данное событие вызвало большой интерес. По некоторым оценкам высота извержения составляла 58 км н.у.м. [13]. Извержение было таким мощным, что в мезосфере и термосфере с помощью метеорных радаров были зафиксированы гравитационные волны от взрыва [21].

В Северном полушарии вулканический аэрозоль был обнаружен в стратосфере через 12 недель после извержения вулкана группой исследователей из Института физики атмосферы Китайской академии наук [14]. Научная группа зафиксировала вулканический аэрозоль на высоте 24–25 км с помощью компактного оптического детектора обратного рассеяния аэрозолей (COBALD) и портативного оптического спектрометра частиц (POPS), которые были размещены на воздушном шаре. Шар был запущен в Лицзяне, провинции Юньнань, 9.04.2022 г. Зарегистрированные аэрозольные частицы (0,42–1,27 мкм) оказались больше стратосферных фоновых аэрозолей (0,22–0,42 мкм), а счетная концентрация  $\sim 1 \text{ см}^{-3}$  превышала фоновую. На этом основании был сделан вывод, что в стратосфере наблюдался вулканический аэрозоль от вулкана Хунга-Тонга. Коэффициенты обратного рассеяния, полученные из измерений COBALD на  $\lambda = 455$  и 940 нм, показали усиление аэрозольных сигналов между 24 и 25 км.

Аэрозоль на высотах 20–25 км в Северном полушарии можно обнаружить по данным лидара

спутника CALIPSO начиная с мая и до середины августа 2022 г. Пример распределения аэрозоля по типам вдоль трассы спутника CALIPSO в стратосфере экваториальной зоны 8.07.2022 г., представленный на рис. 3, показывает, что спутниковый лидар обнаруживает аэрозоль на высоте 20–25 км в основном в экваториальной зоне. Более чувствительный наземный лидар в Томске, в средних широтах, обнаруживает в тот же день 8.07 слабый аэрозольный слой на тех же высотах, что и лидар CALIPSO. Слои в этом диапазоне высот фиксировались в Томске 7, 8, 9, 11 и 12.07 (пики V1–V5 на врезке рис. 1). С учетом результатов работы [14] можно утверждать, что наблюдаемый аэрозоль по данным лидара спутника CALIPSO и наземного лидара в Томске является вулканическим аэрозолем от вулкана Хунга-Тонга.

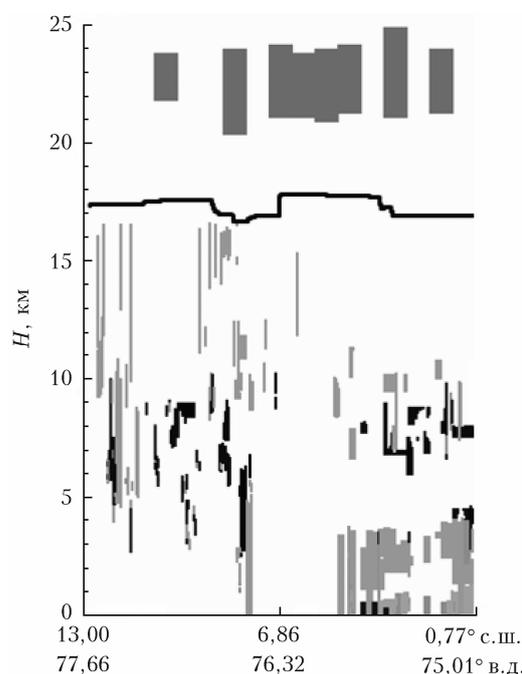


Рис. 3. Распределение аэрозоля по типам вдоль трассы спутника CALIPSO в стратосфере экваториальной зоны 8.07.2022 г. На высоте более 20 км наблюдается аэрозоль от вулкана Хунга-Тонга; классификацию аэрозоля см. в тексте

### **Определение места и времени образования мощных пирокумулятивных облаков в Восточной Сибири**

Выше было показано, что аэрозольные слои в стратосфере, наблюдавшиеся в Томске в июле 2022 г., были связаны с инъекцией сажевого аэрозоля от пожаров в Восточной Сибири. Для определения места и времени образования мощных пирокумулятивных облаков были использованы данные наблюдений в видимом и ИК-диапазонах спектра со спутника Himawari-8 и системы VIIRS о пожарах на спутнике Suomi-NPP. Было обнаружено образование трех мощных пирокумулятивных облаков, способных инжектировать сажевый аэрозоль в нижнюю стратосферу (таблица).

**Пирокумулятивные облака, достигшие тропопаузы  
(25.06.2022 г.)**

№ облака	Время обнаружения РугоСб, UTC	Время достижения тропопаузы, UTC	Координаты пожара, °с.ш.; °в.д.	РугоСб			Тропопауза [22]	
				$T_{min}$ , °C (Himawari-8)	$T$ , °C	$H$ , км	$T$ , °C	$H$ , км
1	05:00	07:10	63,5; 108,8	-61	-58	11,5	-58	11,5
2	05:00	07:10	63,5; 109,0	-61	-58	11,5	-58	11,5
3	07:00	09:10	63,2; 110,4	-60	-58	11,5	-58	11,5

Температура вершин облаков оценивалась на основе данных по яркостной температуре  $T_b$  11-го канала камеры спутника Himawari-8, работающего в ИК-диапазоне на  $\lambda = 8,6$  мкм. В таблице приведена температура вершины облака  $T_{min}$  в момент достижения тропопаузы. Развитие мощных РугоСб от вызвавших их пожаров до выхода сажевого облака на стратосферные высоты показано на рис. 4. На этих фотографиях видно образование и развитие всех трех пирокумулятивных облаков,

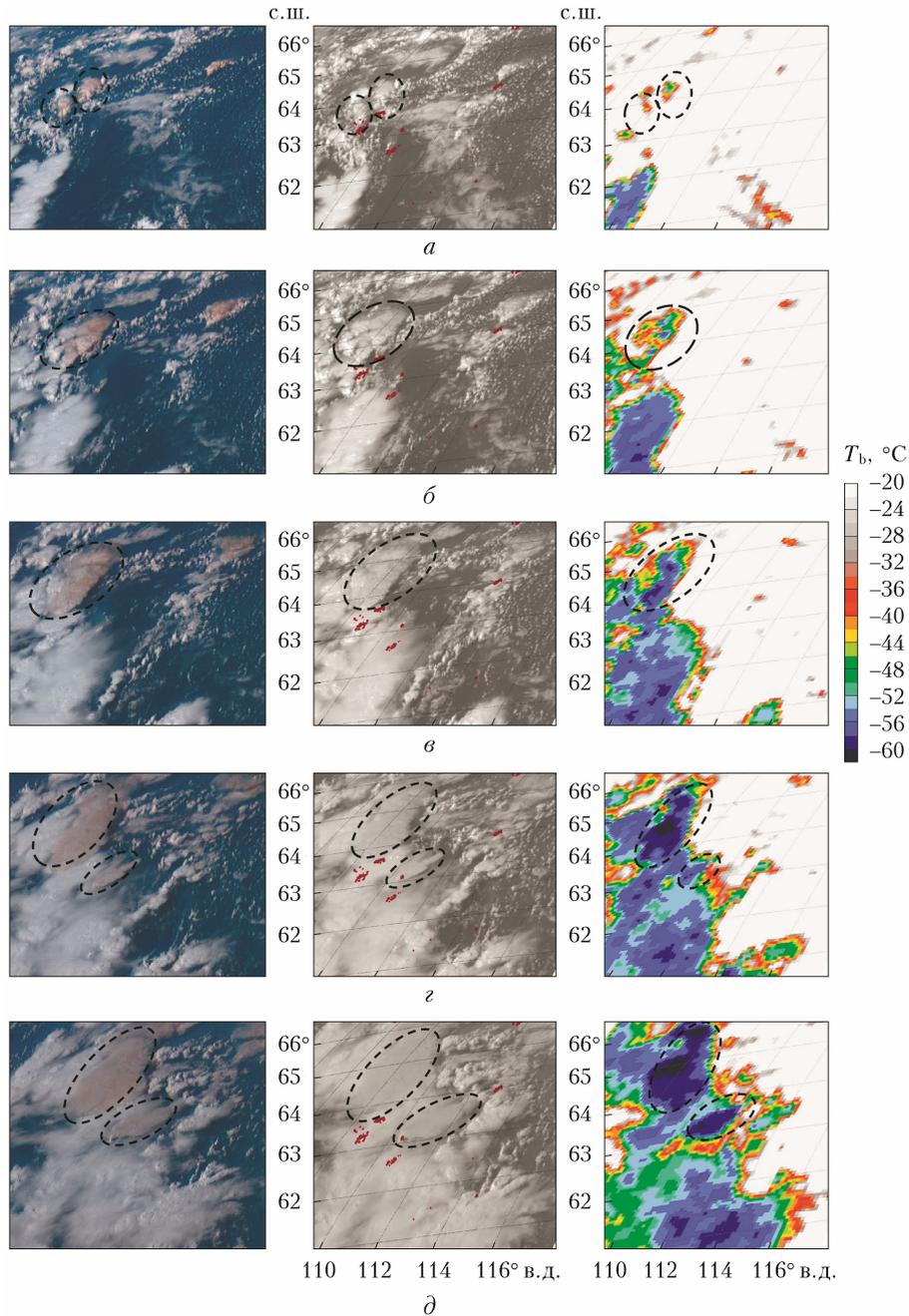


Рис. 4. Динамика образования пирокумулятивных облаков над пожарами, приведенными в таблице: красными точками показаны пожары, зафиксированные системой VIIRS 25.06.2022 г. в 05:00 (а), 06:00 (б), 07:00 (в), 08:00 (г) и 09:10 UTC (д); в левом столбце показаны фотографии в видимом диапазоне со спутника Himawari-8, в среднем – изображение в красном цвете (3-й канал,  $\lambda = 0,64$  мкм), в правом – температура вершин облаков и поверхности земли (11-й канал,  $\lambda = 8,6$  мкм) (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.39-2026/iss.02>)

представленных в таблице. На рис. 4, а видно образование первых двух РугоСб. Далее они практически слились в одно РугоСб (рис. 4, б–д). Затем появилось третье РугоСб (рис. 4, з, д). В итоге согласно картине температур, все три РугоСб вышли на границу тропопаузы (рис. 4, д). Отметим, что на снимках видна облачность верхнего яруса, которая также достигает тропопаузы. Поэтому для определения времени и места образования РугоСб требуется отслеживание всей динамики их развития.

### **Распространение сажевого аэрозоля от пирокумулятивных облаков из-за пожаров в Восточной Сибири**

Расчеты прямых траекторий движения воздушных масс от РугоСб в Восточной Сибири подтверждают вывод, что в стратосфере над Томском с 8 по 11.07.2022 г. наблюдался сажевый аэрозоль на высоте 7–11 км (рис. 5). Был использован метод расчета с мезомасштабным разбросом начальных

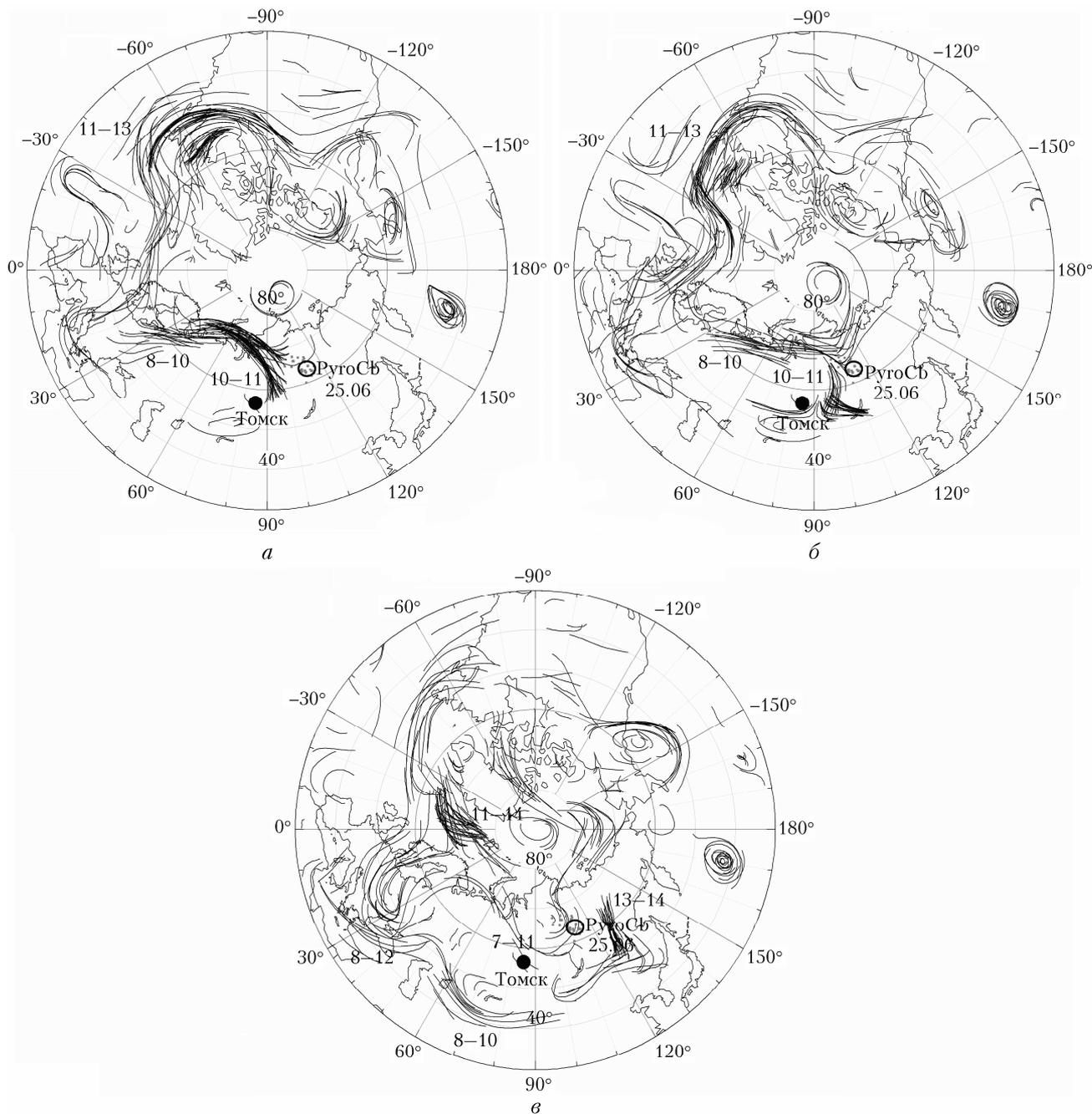


Рис. 5. Суточные отрезки прямых траекторий движения воздушных масс, начавшегося в момент выхода РугоСб на стратосферные высоты в 09:00 UTC: 8.07 (а); 9.07 (б) и 11.07.2022 г. (в); место образования РугоСб отмечено кружком; числа рядом с отрезками соответствуют высотам в километрах, на которых находились воздушные массы

точек, который хорошо показал себя в предыдущих работах по переносу вулканического аэрозоля [23, 24]. Согласно расчетам воздушные массы, содержащие сажевый аэрозоль, пришли в Томск 8 и 9.07 на высотах 10–11 км, а 11.07 – на 7–11 км. Это хорошо соответствует результатам наземных лидарных наблюдений в Томске, представленным на рис. 2.

По данным лидара спутника CALIPSO, стратосфера наполнилась аэрозолями от РугоСб до высот не более 12 км (см. рис. 1, врезка Р2). Тем не менее мы рассчитали траектории движения воздушных масс от РугоСб в Восточной Сибири для высот 13–14 км. В данном случае, согласно рис. 5, аэрозоль на этих высотах в Томске все равно бы не наблюдался.

### Заключение

Летом 2022 г. в стратосфере над Томском с помощью наземного лидара были зафиксированы аэрозольные слои на высотах около 11 и на 20–25 км. Источниками аэрозоля могли быть пожары в Канаде, США, Восточной Сибири, а также извержение вулкана Хунга-Тонга. Для анализа происхождения аэрозольных слоев был использован траекторный анализ с привлечением данных спутникового лидара CALIPSO, что дало возможность зафиксировать аэрозоль в воздушной массе при ее перемещении по рассчитанной траектории и установить географическую область, где произошло ее наполнение аэрозолями. Это позволило установить, что наблюдавшиеся в нижней стратосфере аэрозольные слои возникли в результате пожаров в Восточной Сибири. Точное время и место пироккумулятивной инъекции в стратосферу в Восточной Сибири позволили определить данные спутника Himawari-8 в видимом и ИК-спектрах.

Наблюдение с помощью лидара спутника CALIPSO распространения аэрозольных слоев, возникших после извержения вулкана Хунга-Тонга в Южном полушарии, позволяет достаточно уверенно связать аэрозольные слои, зарегистрированные лидарной станцией в июле 2022 г. в стратосфере над Томском на высотах 20–25 км, с извержением этого вулкана.

Таким образом, получена детальная информация об образовании мощных РугоСб еще в одном регионе интенсивных лесных пожаров – Восточной Сибири, что существенно дополняет результаты исследований РугоСб в Канаде, США и Австралии.

**Благодарности.** Авторы благодарят агентство NASA за предоставленные данные CALIOP, VIIRS, администрацию NOAA за данные GDAS и пакет HYSPLIT, а также Японское метеорологическое агентство за данные Himawari-8. В работе использовалось оборудование ЦКП «Атмосфера» ИОА СО РАН.

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках госзаданий ИХКГ СО РАН (FWGF-2026-0010) и ИОА СО РАН (FWRU-2021-0008).

### Список литературы

1. Pueschel R.F., Verma S., Rohatschek H., Ferry G.V., Boiadjeva N., Howard S.D., Strawa A.W. Vertical transport of anthropogenic soot aerosol into the middle atmosphere // *J. Geophys. Res.* 2000. N 105(D3). P. 3727–3736. DOI: 10.1029/1999JD900505.
2. Fromm M., Lindsey D.T., Servranckx R., Yue G., Trickl T., Sica R., Doucet P., Godin-Beekmann S. The untold story of Pycumulonimbus // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2010. V. 91, N 9. P. 1193–1210. DOI: 10.1175/2010BAMS3004.1.
3. Ansmann A., Baars H., Chudnovsky A., Mattis I., Veselovskii I., Haarig M., Seifert P., Engelmann R., Wandinger U. Extreme levels of Canadian wildfire smoke in the stratosphere over central Europe on 21–22 August 2017 // *Atmos. Chem. Phys.* 2018. V. 18. P. 11831–11845. DOI: 10.5194/acp-18-11831-2018.
4. 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 // *Geophys. Res. Lett.* 2018. V. 45. P. 1639–1646. DOI: 10.1002/2017gl076763.
5. Siddaway J.M., Petelina S.V. Transport and evolution of the 2009 Australian Black Saturday bush fire smoke in the lower stratosphere observed by OSIRIS on Odin // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. P. D06203. DOI: 10.1029/2010JD015162.
6. Vaughan G., Draude A.P., Ricketts H.M.A., Schultz D.M., Adam M., Sugier J., Wareing D.P. Transport of Canadian forest fire smoke over the UK as observed by lidar // *Atmos. Chem. Phys.* 2018. V. 18. P. 11375–11388. DOI: 10.5194/acp-18-11375-2018.
7. Герасимов В.В., Зуев В.В., Савельева Е.С. Следы канадских пироккумулятивных облаков в стратосфере над Томском в июне–июле 1991 г. // *Оптика атмосф. и океана.* 2019. Т. 32, № 1. С. 39–46. DOI: 10.15372/AOO20190106; Gerasimov V.V., Zuev V.V., Savelyeva E.S. Traces of Canadian pyrocumulative clouds in the stratosphere over Tomsk in June–July 1991 // *Atmos. Ocean. Opt.* 2019. V. 32, N 1. P. 39–46.
8. Ansmann A., Ohneiser K., Chudnovsky A., Baars H., Engelmann R. CALIPSO Aerosol-typing scheme misclassified stratospheric fire smoke: Case study from the 2019 Siberian wildfire season // *J. Front. Environ. Sci.* 2021. V. 9. A. 769852. DOI: 10.3389/fenvs.2021.769852.
9. Boers R., de Laat A.T., Stein Zweers D.C., Dirksen R.J. Lifting potential of solar-heated aerosol layers // *Geophys. Res. Lett.* 2010. V. 37, N 24. P. L24802. DOI: 10.1029/2010GL045171.
10. Cheremisina A.A., Vassilyev Yu.V., Horvath H. Gravitophoresis and aerosol stratification in the atmosphere // *J. Aerosol. Sci.* 2005. V. 36. P. 1277–1299. DOI: 10.1016/j.jaerosci.2005.02.003.
11. Ansmann A., Veselovskii I., Ohneiser K., Chudnovsky A. Comment on “stratospheric aerosol composition observed by the atmospheric chemistry experiment following the 2019 Raikoke eruption” by Boone et al. // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2023. N 129. P. e2022JD038080. DOI: 10.1029/2022JD038080.
12. Boone C.D., Bernath P.F., Labelle K., Crouse J. Stratospheric aerosol composition observed by the Atmospheric Chemistry Experiment following the 2019 Raikoke eruption // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2022. N 127. P. e2022JD036600. DOI: 10.1029/2022JD036600.
13. 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 атмосф. и океана. 2021. Т. 34, № 11. С. 898–905. DOI: 10.15372/AOO20211110; *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 // Atmos. Ocean. Opt. 2022. V. 35, N 1. P. 57–64.
14. *Snoun H., Alahmadi M.M., Nikfa A., Arif A., Hatheway W., Alamro M.A., Mihoub A., Krichen M.* Data assimilation enhances WRF-Chem performance in modeling volcanic ash clouds from Hunga Tonga-Hunga Ha’apai eruption // J. Meteorol. Res. 2024. N 38. P. 1122–1140. DOI: 10.1007/s13351-024-4029-6.
  15. *Bian J., Li D., Bai Z., Xu J., Li Q., Wang H., Vömel H., Wienhold F.G., Peter T.* First detection of aerosols of the Hunga Tonga eruption in the Northern Hemisphere stratospheric westerlies // Sci. Bull. 2023. V. 68, N 6. P. 574–577. DOI: 10.1016/j.scib.2023.03.002.
  16. *Маричев В.Н., Бочковский Д.А.* Модернизация лидарного комплекса станции высотного зондирования атмосферы ИОА СО РАН // Вестн. КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2018. № 5(25). С. 17–23.
  17. *CALIPSO.* Lidar Browse Images. URL: [https://www-calipso.larc.nasa.gov/products/lidar/browse\\_images/production/](https://www-calipso.larc.nasa.gov/products/lidar/browse_images/production/) (last access: 25.05.2025).
  18. *CALIPSO.* User’s Guide. Browse Tutorial. URL: [https://www-calipso.larc.nasa.gov/resources/calipso\\_users\\_guide/browse/index.php](https://www-calipso.larc.nasa.gov/resources/calipso_users_guide/browse/index.php) (last access: 25.05.2025).
  19. *NRT VIIRS 375 m Active Fire product VNP14IMG1 distributed from NASA FIRMS.* URL: <https://earthdata.nasa.gov/firms> (last access: 25.05.2025).
  20. *Data integration and analysis system program: official site.* URL: <https://diasjp.net/en/> (last access: 25.05.2025).
  21. *Stober G., Vadas S.L., Becker E., Liu A., Kozlovsky A., Janches D., Qiao Z., Krochin W., Shi G., Yi W., Zeng J., Brown P., Vida D., Hindley N., Jacobi C., Murphy D., Burit R., Andrioli V., Batista P., Marino J., Palo S., Thorsen D., Tsutsumi M., Gulbrandsen N., Nozawa S., Lester M., Baumgarten K., Kero J., Belova E., Mitchell N., Moffat-Griffin T., Li N.* Gravity waves generated by the Hunga Tonga-Hunga Ha’apai volcanic eruption and their global propagation in the mesosphere/lower thermosphere observed by meteor radars and modeled with the High-Altitude general Mechanistic Circulation Model // Atmos. Chem. Phys. 2024. N 24. P. 4851–4873. DOI: 10.5194/egusphere-2023-1714.
  22. *Hoffmann L., Spang R.* An assessment of tropopause characteristics of the ERA5 and ERA-Interim meteorological reanalyses // Atmos. Chem. Phys. 2022. V. 22, N 6. P. 4019–4046. DOI: 10.5194/acp-22-4019-2022.
  23. *Cheremisin A.A., Novikov P.V., Shnipov I.S., Bychkov V.V., Shevtsov B.M.* Lidar observations and the mechanism of formation of the structure of aerosol layers in the stratosphere and mesosphere over Kamchatka // Geomag. Aeron. 2012. V. 52, N 5. P. 690–700. DOI: 10.1134/S0016793212050027.
  24. *Черемисин А.А., Маричев В.Н., Новиков П.В., Павлов А.Н., Шмирко К.А., Бочковский Д.А.* Оценка переноса вулканического аэрозоля в стратосфере над Томском и Владивостоком в 2011 г. по данным лидарных наблюдений // Метеорол. и гидрол. 2019. № 5. С. 50–62.

*I.I. Romanchenko, A.A. Cheremisin, P.V. Novikov, V.N. Marichev, D.B. Bochkovsky.* **Stratospheric aerosol from Siberian forest fires according to lidar observations in July 2022 in Tomsk.**

Soot aerosol from forest fires injected into the stratosphere can influence climate on a global scale, similar to volcanic aerosol. This paper examined the stratospheric loading with soot aerosol from forest fires in Eastern Siberia, as well as the occurrence of volcanic aerosol over Western Siberia. An episode of ground-based lidar observation in July 2022, where aerosol layers were detected in the stratosphere above Tomsk at approximately 11 km and 20–25 km, is considered. The origin of these layers is analyzed using air mass trajectories with control of their aerosol content based on data from the CALIPSO satellite lidar and using atmospheric and surface sensing data from the Suomi-NPP and Himawari-8 satellites. It is shown that the sources of in the lower stratosphere aerosol loading at an altitude of about 11 km are the fires in Eastern Siberia, which led to the formation of powerful pyrocumulative clouds. The location and time of formation of these clouds are determined. It is also shown that the aerosol layers at altitudes 20–25 km are associated with the eruption of the Hunga Tonga-Hunga Ha’apai volcano, which erupted in the Southern Hemisphere in January 2022. The results are of significant interest for predicting climate change on regional and global scales.