

Стратосферный аэрозоль сибирских лесных пожаров по данным лидарных наблюдений в Томске в августе 2019 г.

А.А. Черемисин¹, В.Н. Маричев², Д.А. Бочковский²,
П.В. Новиков^{1,3}, И.И. Романченко^{1*}

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

²Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

³Красноярский институт железнодорожного транспорта
660028, г. Красноярск, ул. Новая Заря, 2и

Поступила в редакцию 22.07.2021 г.

Рассматривается вынос в стратосферу аэрозоля горения от пожаров летом 2019 г., когда были зафиксированы многочисленные лесные пожары на территории Сибири, Канады и Аляски. По результатам лидарных наблюдений, проведенных в Томске в августе 2019 г., в нижней стратосфере были обнаружены явно выраженные слои аэрозольного рассеяния. Анализ результатов расчета обратных траекторий движения воздушных масс с привлечением радиометрической информации со спутников о пожарах в Северном полушарии, а также данных космического лидара со спутника CALIPSO позволяет утверждать, что наблюдаемые аэрозольные слои образовались в результате выноса в стратосферу продуктов горения при пожарах в Сибири.

Ключевые слова: стратосферный аэрозоль, лидарные наблюдения, дым лесных пожаров, метод траекторий, данные спутниковых наблюдений; stratospheric aerosol, lidar observations, forest fire smoke, trajectory analysis, satellite observation data.

Введение

В последнее время увеличиваются частота и интенсивность лесных пожаров. В связи с этим возникает задача корректной оценки влияния пожаров на загрязнение атмосферы в целом, на круговорот углерода в природе, а также на изменение климата [1].

Одно из наиболее впечатляющих явлений, исследования которого стали развиваться в последние два десятилетия, – выброс аэрозолей горения в нижнюю стратосферу при образовании мощных пирокумулятивных кучево-дождевых облаков. Пирокумулятивные облака образуются при возгорании или увеличении мощности огня, когда развивается вертикальная конвекция, усиленная пожаром. Они могут вызвать грозу, которая в своем крайнем проявлении обеспечивает проникновение продуктов горения

через тропопаузу в нижнюю стратосферу. Подобные события нередки и они, вероятно, имели место во время нескольких исторических лесных пожаров. Более того, показано, что привлечение пирокумулятивных облаков позволяет предложить правдоподобное альтернативное объяснение явлениям, которые, как предполагалось ранее, связаны с вулканическими аэрозолями в 1989–1991 гг. [2]. Например, пересмотрена интерпретация данных лидарного зондирования аэрозоля в стратосфере над Томском за период с 29 июня по 14 июля 1991 г. Показано, что многие из наблюдавшихся аэрозольных слоев – это шлейфы лесных пожаров, и они не возникли в результате извержения вулкана Пинатубо, как предполагалось в более ранних работах [3].

В последнее десятилетие при исследовании распространения вулканических аэрозолей также возникают ситуации, когда некоторые из наблюдаемых с помощью лидаров пиков аэрозольного рассеяния можно объяснить аэрозолями горения [4]. Описан случай переноса в стратосферу дыма от лесных пожаров в Южном полушарии (Австралия) [5]. Значительно большее число эпизодов пирокумулятивных выбросов зафиксировано в США и Канаде.

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

В том числе проанализирован целый ряд случаев наблюдения аэрозолей горения в стратосфере Северного полушария, источником которых были канадские лесные пожары [2]. Например, показано появление канадского сажевого аэрозоля в стратосфере над территорией Великобритании в 2016 г. [6].

Большой интерес вызвал значительный выброс дыма в стратосферу, который был порожден пироконвекцией, связанной с лесными пожарами вокруг оз. Атабаска (Канада), в середине августа 2017 г. Согласно лидарным наблюдениям в стратосфере над Центральной Европой с помощью European Aerosol Research Lidar Network (EARLINET) в августе 2017 г., максимальные значения поглощения в аэрозольном слое в стратосфере были на порядок выше, чем наблюдаемые над Центральной Европой (над Германией) зимой 1991/1992 гг. после сильного извержения вулкана Пинатубо в июне 1991 г. [7]. В целом бореальные лесные пожары летом 2017 г. оказали влияние на стратосферную аэрозольную нагрузку в масштабах всего полушария, как и умеренные извержения вулканов [8].

Считается, что сажевый аэрозоль, попавший в стратосферу, является долгоживущим агентом, что имеет климатические последствия. Кроме того, обнаружено, что сажевый аэрозоль от лесных пожаров, попавший в нижнюю стратосферу, с течением времени поднимается на все большие высоты [5]. Поставлен вопрос о целесообразности изучения этого подъема и его механизмов [7]. Например, такое движение вверх может происходить в результате гравитофотопоретического эффекта [9, 10].

Лесные пожары в России бушуют ежегодно, особенно сильные – в Сибирском регионе. Спутниковые снимки России показывают сильную пожарную активность к северо-западу от оз. Байкал в летний период. Аэрозоль горения распространяется по территории всего Северного полушария. Поэтому, например, аэрозольная дымка, наблюдавшаяся двухволновым рамановским лидаром, на высотах более 7 км в Германии (Лейпциг) в 2003 г. была отнесена к сибирским пожарам [11]. С начала 2000-х гг. неоднократно высказывалось мнение, что результаты исследований, посвященных аэрозолям, возникающим при горении биомассы из бореальных районов Азиатского континента, важны для улучшения оценки воздействия аэрозолей на радиационный баланс и климат, но таких публикаций немного [11].

В настоящей работе представлены результаты лидарных наблюдений аэрозольного наполнения верхней тропосферы и стратосферы, проведенных на территории Западной Сибири (Томск) в течение августа 2019 г. Этим летом наблюдались многочисленные пожары на территории Сибири, Канады, Аляски, Казахстана. Причем сибирские пожары были самыми масштабными по площади и времени. В августе в Томске было зафиксировано появление мощных аэрозольных слоев в стратосфере. На основе спутниковой информации и обратных траекторий движения воздушных масс показано, что появление этих аэрозольных слоев можно связать

с мощными пирокумулятивными выбросами аэрозолей горения преимущественно в Сибири, в результате которых шлейф дыма от лесных пожаров достиг стратосферных высот.

Наземные лидарные и спутниковые данные

Лидарные наземные наблюдения проводились на стратосферной лидарной станции Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН в Томске [12] в ночное время методом упругого рассеяния на длине волны лазерного излучения 532 нм; энергия в импульсе – 400 мДж, пространственное разрешение – 192 м, частота следования импульсов – 10 Гц. Диаметр приемного зеркала – 1 м, регистрация осуществлялась в режиме счета фотонов.

Для анализа аэрозольной стратификации атмосферы использовалось отношение обратного рассеяния $R(H)$, представляющее отношение суммарного коэффициента обратного рассеяния к молекулярному на высоте H . При наличии аэрозоля $R(H) > 1$, при отсутствии – $R(H) \approx 1$ с точностью до погрешности измерений. Особенности решения уравнения лазерного зондирования, а также оценка погрешности представлены в [13, 14]. Согласно оценкам [15] погрешность $\delta R/R$ для стратосферы составляет 2–3% на высотах до 30 км при типичных временах накопления сигнала и без учета погрешности калибровки.

Географическое положение пожаров регистрировалось комплексом радиометров видимой и инфракрасной визуализации VIIRS, размещенным на спутнике SuomiNPP [16]. Данные VIIRS (разрешение 375×375 м) позволяют ежедневно отслеживать положение пожаров. Мы использовали данные VIIRS за июль и август 2019 г. На карту наносилось положение наиболее сильных пожаров с излучательной мощностью более 10 МВт на пиксель. Выборка по уровню 10 МВт составила ~20% от всех зарегистрированных пожаров за указанный период.

Для анализа распространения аэрозоля рассчитывались обратные траектории движения воздушных масс начиная с момента наблюдения над Томском. Рассматривались изоэнтропийные траектории, соответствующие высотам пиков аэрозольного рассеяния. Использовался пакет HYSPLIT [17] и данные GDAS [18] по скоростям ветра. Эта методика показала хорошие результаты при исследовании переноса полярных стратосферных облаков над Якутском и Томском [19–21], а также при анализе эффектов извержения вулканов Касаточи [22] и Набро [4].

На пути следования воздушных масс изучалось также высотное распределение аэрозоля по данным, полученным спутниковым облачно-аэрозольным лидаром CALIOP [23]. Этот лидар использует три приемных канала: на 1064 нм и две ортогонально поляризованных компоненты сигнала на 532 нм.

Система обработки данных лидара CALIOP автоматически классифицирует аэрозоль по интегральному обратному рассеянию, отношению деполяризации и цветовому отношению. Эти данные позволяют в частности отделить наблюдаемый дымный аэрозоль от облачного аэрозоля.

Лидарные наблюдения аэрозоля в стратосфере над Томском

По результатам лидарных наблюдений, проведенных в Томске 12, 13 и 26 августа 2019 г., в стратосфере на высотах от 10 до 17 км было зарегистрировано повышенное аэрозольное рассеяние (рис. 1).

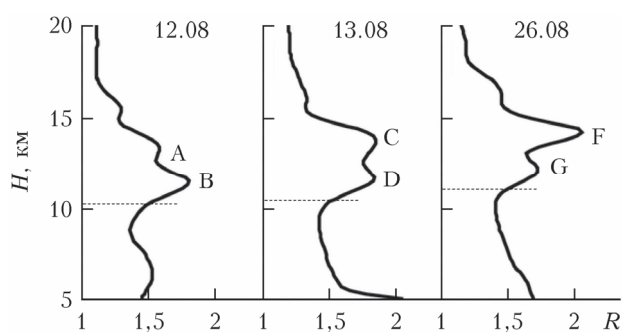


Рис. 1. Лидарные наблюдения аэрозоля над Томском в августе 2019 г.: буквы — интенсивные пики аэрозольного рассеяния, интерпретированные методом обратных траекторий; пунктирная линия — высота тропопазузы

Как видно из рис. 1, в августе 2019 г. наблюдалась многослойная структура аэрозольного наполнения стратосферы над Томском с интенсивными пиками рассеяния, для которых отношение обратного рассеяния достигало значений 1,5–2.

Подобные величины рассеяния в стратосфере сопоставимы с наблюдаемыми после извержения вулканов Касаточи и Набро и даже превышают их [4, 22]. В данном случае примерно за 1,5–2 мес. до лидарных наблюдений аэрозольных слоев в Томске, 21–22 июня 2019 г., произошло извержение взрывного типа вулкана Райкоке [24], расположенного в северной части центральных Курильских островов; продукты извержения достигли стратосферных высот. За это время вулканический аэрозоль должен был трансформироваться практически до остаточного фоновое аэрозольного наполнения в стратосфере. Согласно данным наших исследований целого ряда вулканических извержений, на масштабе примерно месяц в стратосфере происходит формирование аэрозольного наполнения диффузного типа [22]. Поэтому мы предполагаем, что наблюдаемое загрязнение стратосферы аэрозолем над Томском обусловлено другим источником — пожарами, которые полыхали в Восточной Сибири в июле и августе 2019 г. Следует отметить, что ветер на стратосферных высотах в целом имел восточное направление и должен был сносить аэрозоли горе-

ния в противоположную от Томска сторону. Рассмотрим более подробно процесс переноса аэрозолей горения к Томску.

Анализ происхождения наблюдавшихся аэрозольных слоев

На рис. 2 представлены полученные в результате расчетов обратные траектории воздушных масс, пришедшие в Томск 12 августа 2019 г. на высотах 14 и 11,5 км. Эти высоты соответствуют наблюдавшимся интенсивным максимумам аэрозольного рассеяния в стратосфере, помеченным буквами А и В на рис. 1. Точками на траекториях отмечено время 12:00 UTC каждых суток с 12 августа до 22 июля. На картах светло-серыми точками обозначены пожары по данным комплекса VIIRS (сайт FIRMS — Fire Information for Resource Management System [16]). Положение пожаров отмечалось на карте с использованием временного окна, длина которого вдоль траектории равна суточному перемещению воздушных масс, а ширина — ~1000 км. Фактически показаны только те пожары вдоль траектории движения воздушной массы, которые соответствуют времени прохождения соответствующего участка траектории, т.е. можно говорить о соответствии времени и места прохождения воздушной массы и текущей пожарной обстановке.

Стрелками показано направление движения воздушных масс. Траектория А начинается 18 июля, за 26 дней до прохождения над Томском, траектория В — 21 июля, за 23 дня до прохождения над Томском. Ход траекторий на разных высотах различается, но обе они за указанное время огибают Северный полюс и проходят над территориями пожаров в Сибири и Канаде.

Регистрация аэрозоля в стратосфере над Томском указывает на то, что он является результатом пирокумулятивных выбросов в районе пожаров в Сибири или Северной Америке. Чтобы определить примерное место и время такого пирокумулятивного выброса, мы привлекли данные космического лидара CALIOP. Отрезками, пересекающими траекторию движения воздушной массы, показаны фрагменты траектории спутника CALIPSO, которые по времени синхронизированы с траекторией воздушной массы.

Для каждого эпизода пересечения траектории воздушной массы и траектории спутника CALIPSO A1, A2, A3, A4 и A5 на рис. 2 приведен высотный профиль данных лидара CALIOP по типам наблюдаемых аэрозолей с указанием географических координат и даты. Градациями серого указаны три типа аэрозоля:

— тип 1 имеет непосредственное отношение к пожарам и соответствует подтипам: дым (загрязненный континентальный), загрязненная пыль, поднявшийся дым;

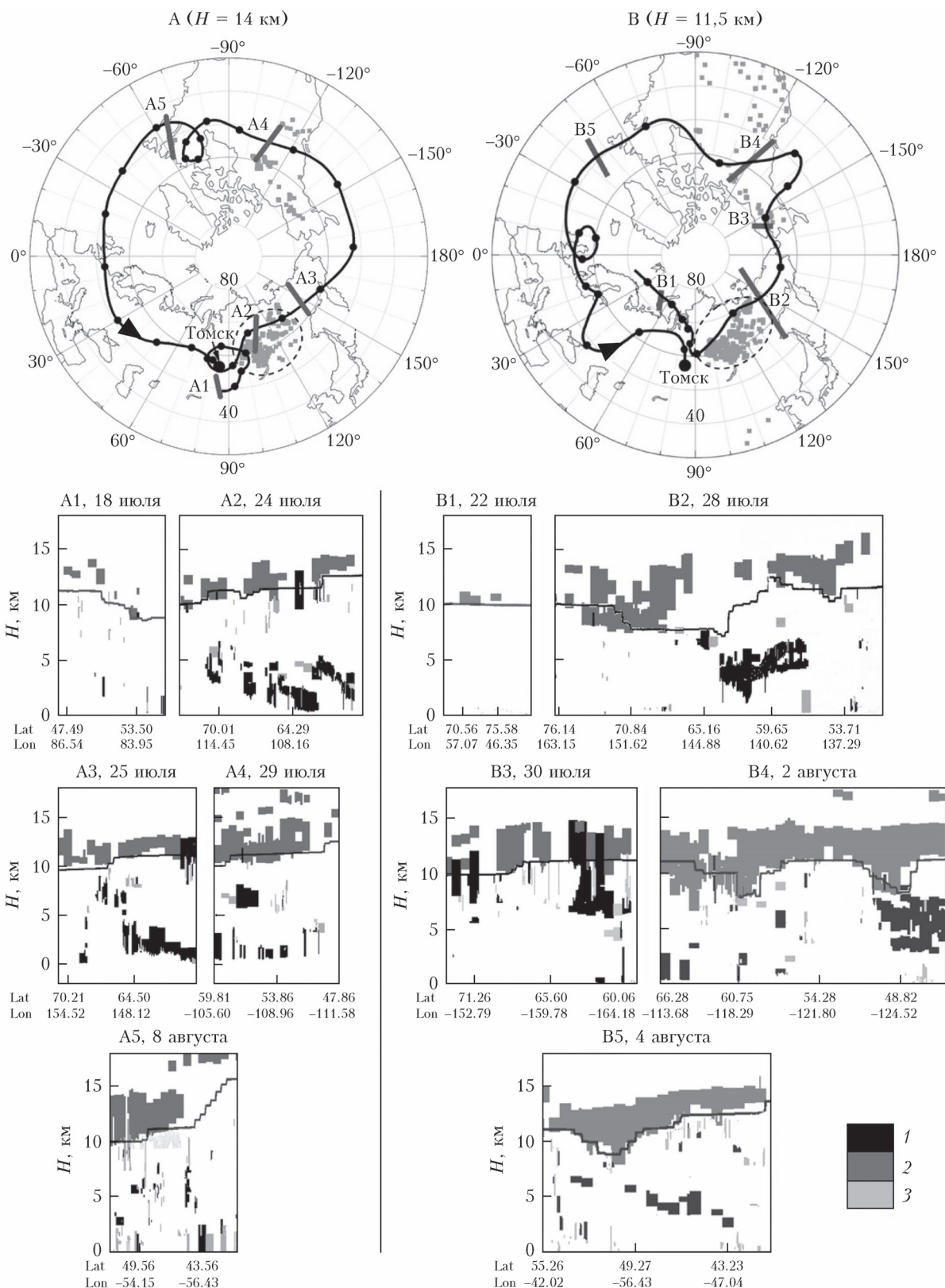


Рис. 2. Траектории А и В воздушных масс, пришедших к Томску 12 августа 2019 г.: стрелка – направление траектории; пунктир – область формирования аэрозольного слоя. Типы аэрозоля: 1 – дым, 2 – стратосферный аэрозоль, 3 – другие типы

– тип 2 – стратосферный аэрозоль, который не классифицируется системой на подтипы из-за сравнительно малого отношения рассеяния;

– тип 3 не имеет отношения к пожарам – это песчаная пыль, чистый континентальный, морской и запыленный морской аэрозоль.

Рассмотрим последовательность пересечений траектории воздушных масс, движущихся на высоте ~ 14 км, с траекторией спутника A1 – A2 – A3 – A4 – A5. На профиле A1 не наблюдается заметного количества аэрозоля в стратосфере. При этом профиль A1 зарегистрирован на расстоянии более 1000 км от обширного кластера мощных лесных пожаров в Сибири. Между A1 и A2 траектория воздушной массы прошла над мощным очагом лесных пожаров в Сибири. При этом на профиле A2, полученном 24 июля, наблюдалось большое количество аэрозоля как в тропосфере, так и в стратосфере на высотах 10–15 км. Можно предположить, что с 20 по 24 июля произошел интенсивный пирокумулятивный выброс продуктов горения в стратосферу где-то в окрестности очага пожаров. При следующем пересечении траекторий воздушной массы и спутника на отрезке A3 был зарегистрирован аэрозоль примерно на тех же высотах (10–14 км), включая высоту, на которой проходила траектория воздушной массы. Далее на профилях A4 и A5 хорошо виден аэрозоль на высотах от 10 до 15 км. После профиля A5 воздушная масса принесла аэрозоль к Томску на высоте 14 км, где наблюдался пик аэрозольного рассеяния (пик A на рис. 1).

Для анализа происхождения более мощного пика B на высоте 11,5 км на рис. 1 была построена обратная траектория, которую пересекали отрезки траектории спутника CALIPSO B1, B2, B3, B4 и B5. Как видно, наполнение воздушных масс аэрозолем произошло на участке траектории от профиля B1 до профиля B2 после прохождения над пожарами в Сибири 27–28 июля.

В цепочке профилей A следует отметить некоторое изменение характера аэрозольного наполнения, которое произошло между A3 и A4. Появилось аэрозольное наполнение на высотах 16–18 км. На этих же высотах наблюдается аэрозоль на профиле A5, и затем на высоте ~ 16 км виден слабый аэрозольный пик над Томском. Заметим, что в это время траектория прошла над кластером канадских пожаров. Можно предположить, что канадские пожары могли внести в аэрозольное наполнение стратосферы свой вклад, небольшой в сравнении с пожарами в Сибири.

Также была рассчитана серия обратных траекторий, заканчивавшихся в Томске 12 августа на промежуточных высотах от 10 до 15 км с шагом 500 м. Кроме описанных выше траекторий A и B, остальные траектории не проходили над районами интенсивных пожаров, по крайней мере, в течение ближайших 20 дней до прихода в Томск. Вероятно, поэтому и наблюдается слоистая структура аэрозольного наполнения в стратосфере. Эти траектории не показаны на рис. 2.

На рис. 3 построены траектории по результатам наблюдения аэрозольных слоев 13 августа 2019 г. В этот день также наблюдалось два больших пика аэрозольного рассеяния. Траектория C соответствует пику на высоте 14 км. Показана цепочка пересечений с траекторией CALIPSO: C1 – C2 – C3 – C4.

Другая траектория (пик на высоте 12 км) имеет цепочку пересечений D1 – D2 – D3 – C4. Для последней траекторией взят общий разрез C4, так как в этом месте траектории на высотах 12 и 14 км прошли близко друг к другу по пространству и времени. Обе траектории начались над Китаем, прошли над Сибирью, Аляской, Канадой, Атлантикой и Северной Европой и затем пришли к Томску. Согласно профилю C1 аэрозоль в стратосфере отсутствовал в соответствующий момент движения воздушных масс, а на профиле C2 появилось существенное аэрозольное наполнение. Можно предположить, что аэрозоль появился в результате пирокумулятивного выброса в районе сибирских пожаров на участке траектории C1 – C2. Аналогично воздушные массы, двигавшиеся по траектории на высоте 12 км, получили аэрозоль тоже в районе сибирских пожаров на участке D1 – D2.

На рис. 4 приведены траектории, прошедшие над Томском 26 августа 2019 г. на высотах максимумов аэрозольного рассеяния – 14,5 и 13 км. Траектория F соответствует высоте 14,5 км. В цепочке пересечений F1 – F2 – F3 – F4 с траекторией CALIPSO стратосферный аэрозоль появился между F1 и F2. Согласно профилю F1 сначала в основном был загрязнен приземный слой до высоты 5 км. Можно отметить, что на профиле F2 в точке 66° с.ш., 95° в.д. аэрозоли горения фиксируются космическим лидаром от поверхности Земли до стратосферы. Вероятно, траектория спутникового лидара прошла вблизи пирокумулятивного выброса. На срезе F3 уже наблюдается резкое разделение аэрозоля на стратосферный и тропосферный. Тропосфера загрязнена, так как траектория проходит над регионом канадских лесных пожаров. На профиле F4 видим, что картина аэрозольного наполнения стратосферы над Атлантикой сохраняется. При этом в тропосфере фиксируется наличие морского аэрозоля.

Для анализа происхождения пика G, зарегистрированного 26 августа над Томском на высоте ~ 13 км (см. рис. 1), была построена обратная траектория, для которой были найдены пересекающие ее отрезки траектории спутника CALIPSO G1 – G2 – F3 – F4. На профиле G1 над атлантическим побережьем Канады практически отсутствует аэрозоль (рис. 4). Далее воздушные массы двигались над Атлантическим океаном, Северной Европой и югом России. На пересечении с отрезком G2 воздушные массы уже двигались над регионом сибирских пожаров. При этом на профиле G2 в стратосфере появилось большое количество аэрозоля. Далее аэрозольное наполнение стратосферы сохраняется (профили F3 и F4) до Томска, где оно было зарегистрировано наземным лидаром.

Таким образом, проведенный анализ показал, что аэрозольные загрязнения попали в стратосферу над Томском длинным путем: от сибирских пожаров на восток через Канаду, Атлантический океан и Европу.

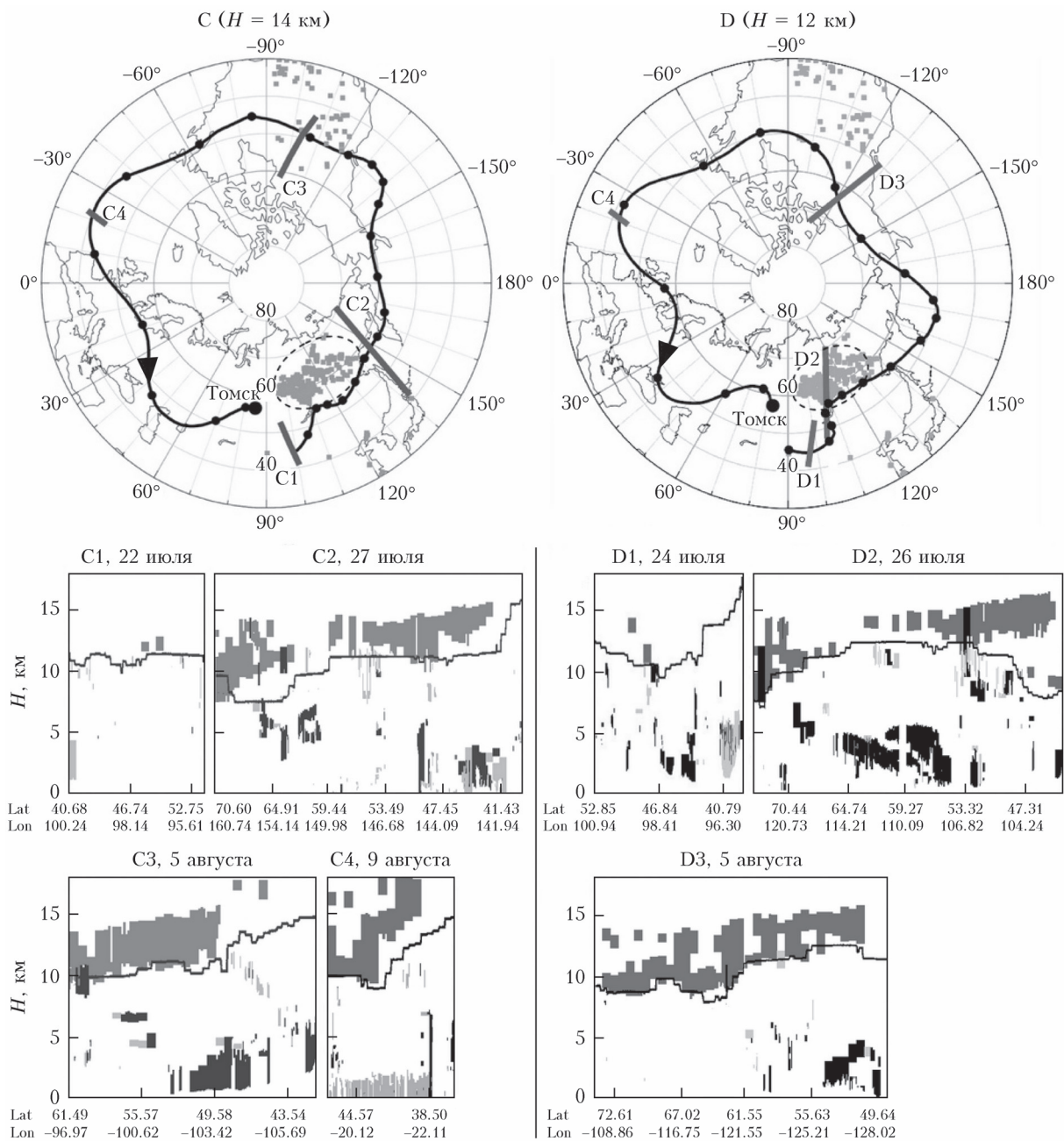


Рис. 3. Траектории C и D воздушных масс, пришедших к Томску 13 августа 2019 г. Обозначения см. в подписи к рис. 2

Заключение

Показано, что зарегистрированное с помощью стратосферной лидарной станции ИОА СО РАН в августе 2019 г. появление мощных аэрозольных слоев в стратосфере над Томском связано с мощными пирокумулятивными выбросами аэрозолей горения в Сибири, в результате которых шлейф дыма от лесных пожаров достиг стратосферных высот. Происхождение большинства наблюдавшихся аэрозольных слоев было связано в основном с пожарами в Сибири.

Были построены обратные траектории движения воздушных масс по спутниковым данным о скоростях ветра в Северном полушарии. Начальные точ-

ки обратных траекторий соответствовали высотам максимумов аэрозольного рассеяния в стратосфере над Томском. Привлечение радиометрической информации со спутников позволило определить положение интенсивных пожаров вдоль траекторий. Показано, что воздушные массы пришли к Томску не напрямую из района сибирских пожаров, а совершив большой круг: двигаясь на восток, пересекли северную часть Тихого океана, затем прошли над территорией Канады, пересекли Атлантику, прошли над Европой и европейской частью России и достигли Томска. Их траектории расположены над районами, охваченными интенсивными лесными пожарами, как в Восточном, так и в Западном полушариях.

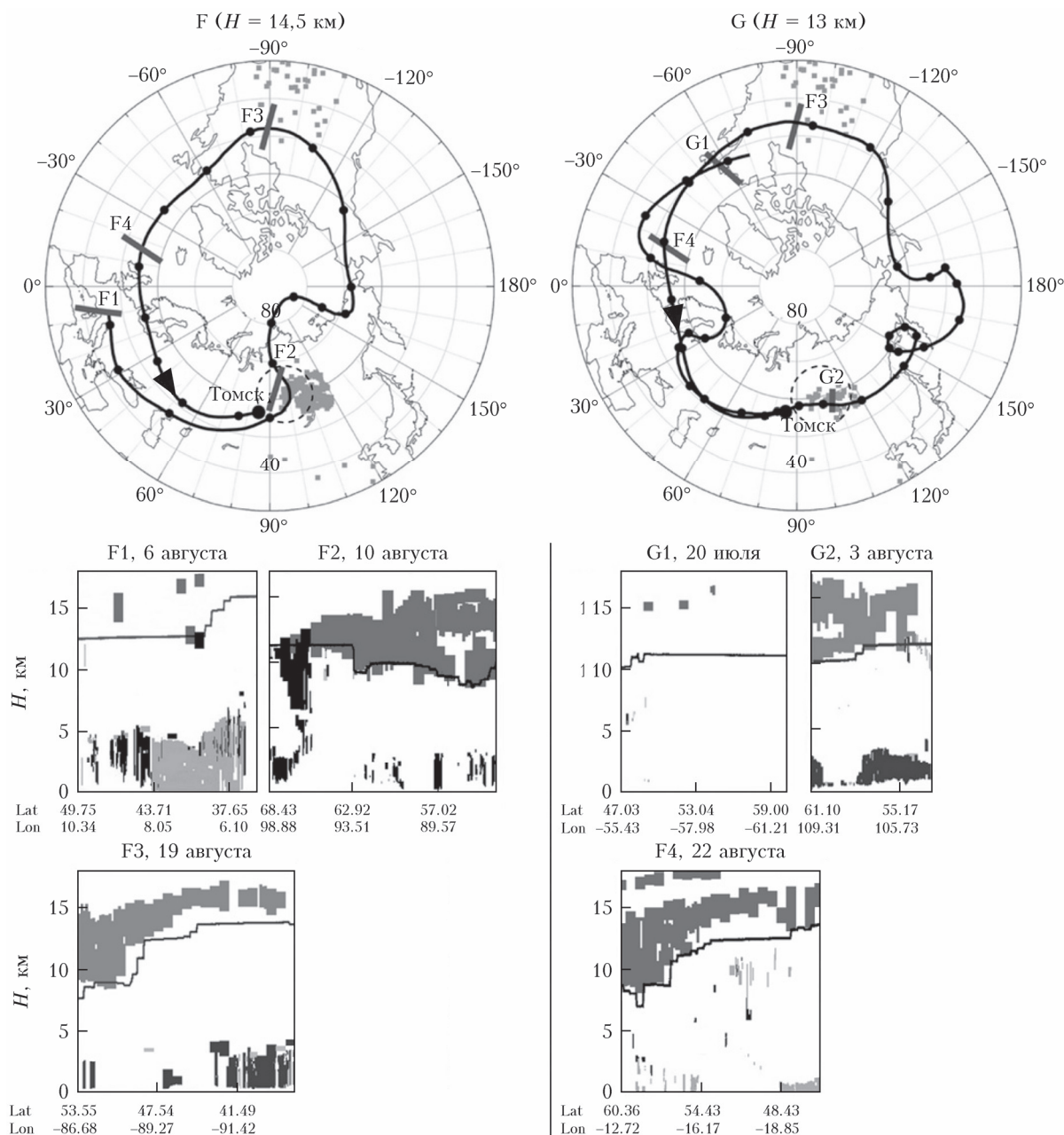


Рис. 4. Траектории F и G воздушных масс, пришедших к Томску 26 августа 2019 г. Обозначения см. в подписи к рис. 2

Для идентификации пирокумулятивных выбросов в стратосферу были привлечены данные космического лидара CALIOP со спутника CALIPSO. Траектории воздушных масс неоднократно пересекались треками спутника. Среди таких пересечений были отобраны только те, для которых обеспечивалась синхронность появления спутника и рассматриваемой воздушной массы в точке пересечения с суточной точностью. Рассмотрение временной последовательности пересечений в сочетании с радиометрической информацией о пожарах и с данными CALIOP о появлении стратосферного аэрозоля позволило оценить примерное время и место пирокумулятивных выбросов сажевого аэрозоля на стратосферные высоты. В основном такие выбросы произошли над сибирским кластером лесных пожаров.

Полученная информация расширяет наши знания об источниках наполнения стратосферы аэрозолем и в конечном итоге может служить для более достоверной оценки влияния этого аэрозоля на климат.

Проведение экспериментов и набор данных по зондированию стратосферы выполнены в рамках государственного задания ИОА СО РАН (№ 121031500341-3), а обработка и анализ результатов измерений – при финансовой поддержке РФФИ (проект р_а № 19-45-700008) в соответствии с требованиями, перечисленными в соглашении между РФФИ, ИОА СО РАН и руководителем проекта, и с требованиями конкурсной документации. Сотрудники ИХКГ СО РАН благодарят Министерство науки и высшего образования РФ за финансовую поддержку в рамках государственного задания.

1. Bowman D.M., Balch J.K., Artaxo P., Bond W.J., Carlson J.M., Cochrane M.A., D'Antonio C.M., De-fries R.S., Doyle J.C., Harrison S.P., Johnston F.H., Keeley J.E., Krawchuk M.A., Kull C.A., Marston J.B., Moritz M.A., Prentice I.C., Roos C.I., Scott A.C., Swetnam T.W., van der Werf G.R., Pyne S.J. Fire in the Earth system // *Science*. 2009. V. 324, N 5926. P. 481–484.
2. Fromm M., Lindsey D.T., Seroranckx R., Yue G., Trickl T., Sica R., Doucet P., Godin-Beekmann S. The untold story of pyrocumulonimbus // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 2010. V. 91, N 9. P. 1193–1210.
3. Герасимов В.В., Зуев В.В., Савельева Е.С. Следы ка-надских пирокумулятивных облаков в стратосфере над Томском в июне–июле 1991 г. // *Оптика атмосф. и океана*. 2019. Т. 32, № 1. С. 39–46; Gerasimov V.V., Zuev V.V., Savelieva E.S. Traces of Canadian pyrocumulonimbus clouds in the stratosphere over Tomsk in June–July, 1991 // *Atmos. Ocean. Opt.* 2019. V. 32, N 3. P. 316–323.
4. Черемисин А.А., Маричев В.Н., Новиков П.В., Пав-лов А.Н., Шмирко К.А., Бочковский Д.А. Оценка пе-реноса вулканического аэрозоля в стратосфере над Томском и Владивостоком в 2011 г. по данным лидар-ных наблюдений // *Метеорол. и гидрол.* 2019. № 5. С. 50–62.
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.
6. Vaughan G., Draude A.P., Ricketts H.M.A., Schultz D.M., Adam M., Sugier J., Wareing D.P. Transport of Cana-dian forest fire smoke over the UK as observed by lidar // *Atmos. Chem. Phys.* 2018. V. 18. P. 11375–11388.
7. Ansmann A., Baars H., Chudnovsky A., Mattis I., Vese-lovskii I., Haarig M., Seifert P., Engelmann R., Wan-dinger 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.
8. Khaykin S.M., Godin-Beekmann S., Hauchecorne A., Pe-lon 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.
9. Cheremisin A.A., Vassilyev Yu.V., Horvath H. Gravito-phophoresis and aerosol stratification in the atmos-phere // *J. Aeros. Sci.* 2005. V. 36. P. 1277–1299.
10. Cheremisin A.A. Photophoresis of aerosol particles with nonuniform gas-surface accommodation in the free molecular regime // *J. Aerosol. Sci.* 2019. V. 136. P. 15–35.
11. Mueller D., Mattis I., Wandinger U., Ansmann A., Al-thausen D., Stohl A. Raman lidar observations of aged Siberian and Canadian forest fire smoke in the free troposphere over Germany in 2003: Microphysical particle characterization // *J. Geophys. Res.: Atm.* 2005. V. 110, N D17. P. D17201.
12. Лидарный мониторинг облачных и аэрозольных по-лей, малых газовых составляющих и метеопараметров атмосферы / под ред. Г.Г. Матвиенко. Томск: Изд-во ИОА, 2015. 449 с.
13. Лазерное зондирование тропосферы и подстилающей поверхности / отв. ред. В.Е. Зуев. Новосибирск: Нау-ка, 1987. 262 с.
14. Ельников А.В., Креков Г.М., Маричев В.Н. Лидар-ные наблюдения стратосферного слоя аэрозоля над Западной Сибирью // *Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана*. 1988. Т. 24, № 8. С. 818–823.
15. Черемисин А.А., Новиков П.В., Шнипов И.С., Быч-ков В.В., Шевцов Б.М. Лидарные наблюдения и ме-ханизм формирования структуры аэрозольных слоев в стратосфере и мезосфере над Камчаткой // *Геомат. аэрон.* 2012. Т. 52, № 5. С. 690–700.
16. NRT VIIRS 375 m Active Fire product VNP14IMG1 distributed from NASA FIRMS [Electronic resource]. URL: <https://earthdata.nasa.gov/firms> (last access: 14.07.2021).
17. Draxler R.R. HYSPLIT_4 User's Guide. NOAA Tech-nical Memorandum ERL ARL-230. 1999. 35 p. [Electro-nic resource]. URL: <https://www.arl.noaa.gov/docu-ments/reports/arl-230.pdf> (last access: 14.07.2021).
18. GDAS: Global Data Assimilation System [Electronic re-source]. URL: <http://ready.arl.noaa.gov/gdas1.php> (last access: 14.07.2021).
19. Черемисин А.А., Кушнарченко А.В., Маричев В.Н., Николашкин С.В., Новиков П.В. Метеорологические условия и полярные стратосферные облака над Якут-ском зимой 2004/05 гг. // *Метеорол. и гидрол.* 2007. № 3. С. 43–53.
20. Черемисин А.А., Маричев В.Н., Новиков П.В. Пере-нос полярных стратосферных облаков из Арктики к Томску в январе 2010 г. // *Оптика атмосф. и океана*. 2013. Т. 26, № 2. С. 93–99; Cheremisin A.A., Ma-richev V.N., Novikov P.V. Transport of polar strato-spheric clouds from the Arctic to Tomsk in January 2010 // *Atmos. Ocean. Opt.* 2013. V. 26, N 6. P. 492–498.
21. Cheremisin A.A., Marichev V.N., Novikov P.V., Ba-rashkov T.O., Bochkovsky D.A. Analysis of polar strato-spheric cloud observations at Tomsk in January 2016 // 22nd Int. Symp. Atm. Oc. Opt.: *Atm. Phys. Tomsk*, 2016. Proc. SPIE. 2016. V. 10035. P. 100355X-1–100355X-5.
22. Черемисин А.А., Маричев В.Н., Новиков П.В. Ли-дарные наблюдения вулканического аэрозоля в атмо-сфере над Томском // *Метеорол. и гидрол.* 2011. № 9. С. 46–56.
23. CALIPSO Lidar Browse Images [Electronic resource]. URL: https://www-calipso.larc.nasa.gov/products/li-dar/browse_images/production/ (last access: 14.07.2021).
24. Гирина О.А., Ляпун Е.А., Уваров И.А., Крамаре-ва Л.С. Извержение вулкана Райкоке 21 июня 2019 г. // *Соврем. пробл. дист. зонд. Земли из косм.* 2019. Т. 16, № 3. С. 303–307.

A.A. Cheremisin, V.N. Marichev, D.A. Bochkovskii, P.V. Novikov, I.I. Romanchenko. Stratospheric aerosol from Siberian forest fires according to lidar observations in Tomsk in August 2019.

In this work, we examine the transport of combustion aerosol into the stratosphere in summer 2019, when numerous wildfires occurred in Siberia, Canada, and Alaska. According to lidar observations carried out in Tomsk at the stratospheric lidar station of IAO SB RAS in August 2019, distinct layers of aerosol scattering were detected in the lower stratosphere. The analysis of back air mass trajectories calculated on the basis of satellite radiometric information about fires in the Northern Hemisphere and CALIPSO lidar data allows a conclusion that the aerosol layers observed were formed by the combustion products of fires in Siberia transported into the stratosphere.