

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 551.21

Следы канадских пирокумулятивных облаков в стратосфере над Томском в июне – июле 1991 г.

В.В. Герасимов^{1,2}, В.В. Зуев¹, Е.С. Савельева^{1*}

¹Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3

²Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 30.05.2018 г.; после доработки 19.09.2018 г.

Пересмотрены результаты лидарного зондирования аэрозоля в стратосфере над Томском за период с 29 июня по 14 июля 1991 г., первоначально интерпретированные как аэрозольные слои после извержения вулкана Пинатубо. С помощью траекторной модели NOAA HYSPLIT показано, что аэрозольные слои, зарегистрированные 29 июня и 11 июля на высотах 12 и 14,2 км соответственно, являлись стратосферным дымовым шлейфом от крупных лесных пожаров, имевших место в июне 1991 г. в провинции Квебек (Канада). Продукты горения достигли стратосферы за счет конвективного подъема внутри пирокумулятивного облака (ругоСb), зарегистрированного 19 июня в 100 км к западу от г. Бэ-Комо (Квебек, Канада). Аэрозольные слои, наблюдаемые 8, 9 и 14 июля на высотах от 11 до 16,5 км, представляли собой суперпозиции дымового шлейфа от квебекского ругоСb и первых следов извержения вулкана Пинатубо.

Ключевые слова: стратосферный аэрозоль, лидар, Пинатубо, пирокумулятивное облако, крупный лесной пожар; stratospheric aerosol, lidar, Pinatubo, pyrocumulonimbus, massive forest fire.

Введение

С 12 по 15 июня 1991 г. произошла серия извержений вулкана Пинатубо на Филиппинах (15,1° с.ш.; 120,3° в.д.). Плинианское извержение 15 июня 1991 г. было самым мощным в XX в. после извержения вулкана Новарупта в 1912 г. на полуострове Аляска [1]. Согласно спутниковым наблюдениям основная масса аэрозоля с конца июня до середины июля 1991 г. находилась преимущественно в стратосфере на высотах 20–25 км в широтном диапазоне 20° ю.ш. – 30° с.ш. [2–4]. Например, на тропической наземной лидарной станции Мауна-Лоа (Гавайи, США) следы извержения Пинатубо впервые наблюдались 1 июля на высотах 21,5–22,8 км [5]. Тем не менее сообщения о регистрации первых стратосферных аэрозольных слоев лидарными станциями средних и высоких широт Северного полушария стали поступать уже через две недели после извержения. Считалось, что следы извержения Пинатубо были обнаружены 26 июня над г. Боулдер (Колорадо, США) на высотах 15–16 км [6], 28 июня над г. Цукуба (Япония) на 15 км [7], 1 июля над г. Фраскати (Италия) на 14–15 км [8], станциями Observatoire de Haute-Provence (Франция) на высоте 16 км [9] и Гармиш-Партенкирхен (Германия) на 15 км [10]. Первое аэрозольное облако над г. Ларами (Вайоминг, США) наблюдалось только через

месяц после извержения – 16 июля на 16–17 км [11], а над г. Хамптон (Вирджиния, США) – 3 августа 1991 г. (через 48 дней) на 17 км [12]. Согласно работе [13] первые следы извержения Пинатубо над г. Томском были зарегистрированы с помощью лидара 29 июня на высоте около 12 км. Стратосферные аэрозольные слои, обнаруженные над г. Томском в начале – середине июля, также были определены как последствия этого извержения [13, 14].

Однако исследования последних двух десятилетий показали, что в дополнение к вулканическим извержениям существует еще один источник, способный вызвать кратковременные, но сильные аэрозольные возмущения стратосферы [15]. Этот источник – пирокумулятивные облака, возникающие в результате крупных лесных пожаров и способные выбрасывать продукты горения в нижнюю стратосферу на высоту до 9 км над тропопаузой [16]. В работе [15] при использовании траекторного анализа было установлено: 1) извержения Пинатубо 12–15 июня 1991 г. не могли быть источником аэрозольных слоев в стратосфере, зарегистрированных 1 июля 1991 г. на трех лидарных станциях в Европе [8–10]; 2) таким источником с большой вероятностью могли быть пирокумулятивные облака, сформировавшиеся в провинции Квебек (Канада) 19 июня 1991 г. Следовательно, при определении причин появления аэрозольных слоев в стратосфере необходимо принимать во внимание данный тип источников.

Приведенные факты позволяют предположить, что первые аэрозольные слои, обнаруженные над

* Владислав Владимирович Герасимов (gvvsnake@mail.ru); Владимир Владимирович Зуев (vzuev@imces.ru); Екатерина Сергеевна Савельева (ekat.savelieva@gmail.com).

г. Томском после извержения Пинатубо, могли быть следствием канадских пожаров. В настоящей работе с помощью траекторного анализа идентифицируются источники аэрозольных слоев, зарегистрированных над г. Томском с 29 июня по 14 июля 1991 г. [13, 14].

Материалы и методы исследования

Анализируемые в работе данные дистанционного зондирования за 1991 г. [13, 14] были получены с помощью аэрозольного лидара, разработанного в Институте оптики атмосферы. Импульсный Nd:YAG лазер ЛТИ-701 с рабочей длиной волны $\lambda = 532$ нм, средней мощностью 1 Вт и частотой следования импульсов 3 кГц использовался в качестве передатчика лидарной системы. Приемная система лидара включала в себя телескоп системы Ньютона с главным зеркалом диаметром 1 м. Сигналы обратного рассеяния регистрировались в режиме счета фотонов с вертикальным разрешением 375 м и временем накопления 20–30 мин. Параметры лидарной установки подробно приведены в [17]. Для описания вертикального распределения стратосферного аэрозоля использовалось отношение рассеяния [17]:

$$R(H) = \frac{\beta_{\pi}^m(H) + \beta_{\pi}^a(H)}{\beta_{\pi}^m(H)} = 1 + \frac{\beta_{\pi}^a(H)}{\beta_{\pi}^m(H)},$$

где $\beta_{\pi}^m(H)$ и $\beta_{\pi}^a(H)$ — коэффициенты молекулярного и аэрозольного обратного рассеяния. Согласно [13, 14] максимальная погрешность измерения лидарных сигналов и определения $R(H)$ с указанными пространственно-временными характеристиками не превышала 10% на высоте 30 км.

Для установления источников аэрозольных слоев, обнаруженных в стратосфере над г. Томском, использовались обратные траектории движения воздушных масс. За начало отсчета траекторий брались момент времени и координаты регистрации этих слоев лидаром. Все траектории были вычислены с помощью траекторной модели NOAA HYSPLIT [18, 19].

Пирокумулятивные облака

Крупные лесные пожары, дымовые шлейфы от которых могут достичь нижней стратосферы и вызвать в ней сильные аэрозольные возмущения, интенсивно исследуются с начала XXI в. [15, 16, 20–32]. Дымовые шлейфы от подавляющего большинства лесных пожаров не выходят за пределы пограничного слоя атмосферы [33–35], и лишь небольшое их число (< 5–10%) попадает в среднюю и верхнюю тропосферу [36, 37]. Только в исключительных случаях аэрозольные шлейфы от крупных пожаров способны выйти в нижнюю стратосферу за счет конвективного подъема внутри пирокумулятивного облака (ругоСб) [38].

РугоСб — это порожденное сильным пожаром грозовое облако, содержащее большое количество продуктов горения биомассы. Такие облака появляются преимущественно при горении обширных пло-

щадей бореальных лесов России и Северной Америки [15] или буша в Австралии и Новой Зеландии [22, 30]. В своем экстремальном проявлении ругоСб забрасывает аэрозольный дымовой шлейф от пожара в нижнюю стратосферу. Например, в течение сезона лесных пожаров летом 2002 г. в США и Канаде было зарегистрировано 17 ругоСбс, часть из которых достигла нижней стратосферы [15]. Стратосферные шлейфы от ругоСбс распространяются в масштабах полушария Земли и могут вызывать заметные климатические последствия. После своего появления такие шлейфы регистрируются от двух до четырех месяцев с помощью лидаров как наземного, так и космического базирования [15, 20, 24].

Возможность наблюдать в г. Томске с помощью лидара стратосферные аэрозольные шлейфы от ругоСбс, возникших в результате крупных лесных пожаров в США и Канаде, упоминалась в [39]. Для сопоставления аэрозольного слоя с его источником (ругоСб или извержением вулкана) необходимо знать координаты и время появления последнего. Если координаты и время образования ругоСб, достигшего стратосферы, известны и при этом в данной области не было вулканических извержений, то достаточно показать, что траектория HYSPLIT начиналась из области образования ругоСб или проходила через области атмосферы (например, над Атлантикой и/или Европой), где его дымовой шлейф регистрировался с помощью спутниковых наблюдений [15, 40, 41]. Отметим, что из-за потенциального влияния ругоСбс на климат в последнее время их обнаружению и регистрации уделяется большое внимание, в частности с помощью сети геостационарных спутников (Geostationary Operational Environmental Satellites) [42].

Пересмотр результатов зондирования в г. Томске

С конца XX в. до начала XXI в. зафиксировано мало надежных случаев наблюдения ругоСбс. Тем не менее 19 июня 1991 г. в провинции Квебек (Канада) были зарегистрированы два ругоСбс. Согласно [15] одно из этих облаков появилось в 100 км к западу от г. Бэ-Комо и вынесло продукты горения в стратосферу. Спустя три дня (22 июня) его дымовой шлейф был обнаружен на высоте около 2 км выше тропопаузы над Данией (56,0° с.ш., 11,1° в.д.) с помощью спутника программы SAGE II. Позднее (1 июля) следы шлейфа регистрировались наземными лидарами в стратосфере над Италией (41,8° с.ш., 12,7° в.д.) [8] и Францией (44,0° с.ш., 6,0° в.д.) [9] на высотах 14–16 км. Над Германией (47,5° с.ш., 11,1° в.д.) выраженные аэрозольные слои от данного ругоСб регистрировались с 1 по 3 июля на высотах 13–16 км [43]. Таким образом, дымовые шлейфы от канадских пожаров достигли европейской стратосферы раньше аэрозолей с Филиппин после извержения Пинатубо. Поэтому нельзя исключать, что аэрозольные слои, обнаруженные над г. Томском (56,48° с.ш., 85,05° в.д.) в конце июня — середине

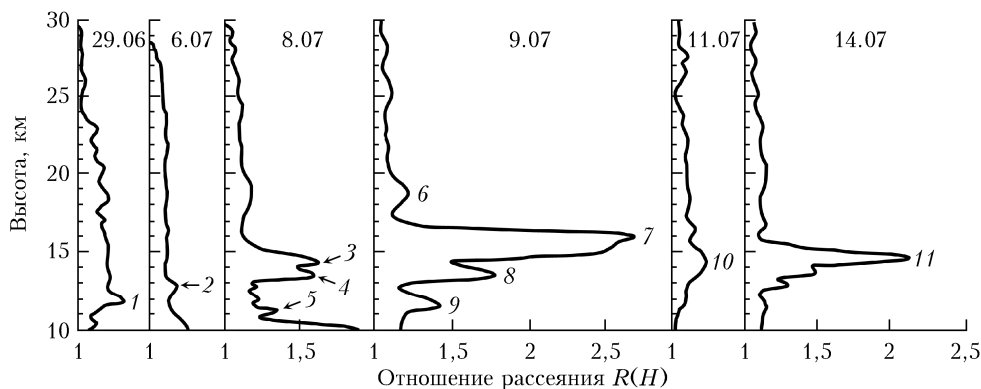


Рис. 1. Профили отношения рассеяния $R(H)$, полученные с 29 июня по 14 июля 1991 г. в стратосфере над г. Томском после извержения вулкана Пинатубо 12–15 июня 1991 г.; 1–11 – максимумы аэрозольных слоев

июля 1991 г., могли быть следствием ругоСbs, возникших из-за пожаров в Квебеке.

На рис. 1 представлены результаты лидарного зондирования стратосферного аэрозоля над г. Томском, полученные с 29 июня по 14 июля 1991 г. [13, 14]. Максимумы аэрозольных слоев, зарегистрированных за данный период, для удобства анализа пронумерованы. Траекторный анализ, выполненный с помощью модели NOAA HYSPLIT (рис. 2), однозначно исключает выбросы вулкана Пинатубо как источник первого аэрозольного слоя, наблюдаемого над Томском 29 июня (28 июня в 19:00 UTC) на высоте около 12 км (рис. 1).

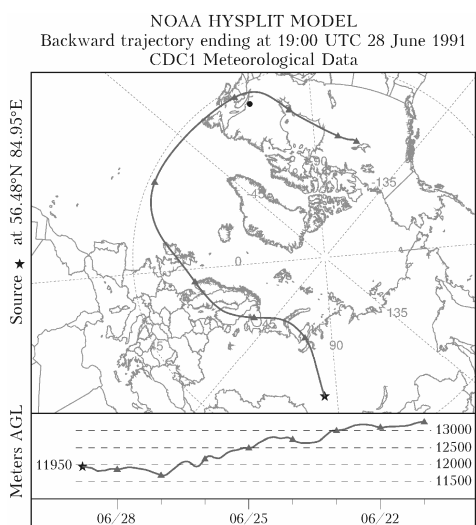


Рис. 2. Обратная траектория воздушных масс, начинающаяся от аэрозольного максимума 1 (см. рис. 1), зарегистрированного над г. Томском 29 июня 1991 г. в 02:00 (28 июня в 19:00 UTC). Черный кружок обозначает координаты ругоСb, образовавшегося 19 июня 1991 г. в провинции Квебек (Канада)

Действительно, из рис. 2 следует, что траектория движения воздушных масс полностью лежит выше 45° с.ш., находится в нижней стратосфере над Канадой с 21 по 24 июня, проходит над территорией провинции Квебек 23–24 июня вблизи места появления ругоСb 19 июня 1991 г. и далее следует над северной частью Атлантического океана, где

(согласно данным SAGE II [15]) находился стратосферный дымовой шлейф от ругоСb. Учитывая, что аэрозоль от квебекского пожара регистрировался в стратосфере над Европой с 22 июня по 3 июля, он мог быть захвачен воздушными массами на пути в г. Томск как над Атлантикой, так и над территорией Европы. Таким образом, указанное пирокумулятивное облако – наиболее вероятная причина появления аэрозольного слоя над г. Томском 29 июня.

На рис. 3 аэрозольные слои, зарегистрированные в стратосфере над г. Томском 6 и 8 июля, сопоставляются с их вероятными источниками. Незначительный аэрозольный слой наблюдался в стратосфере над г. Томском 6 июля (5 июля в 19:00 UTC) в высотном диапазоне 12,5–13,0 км (рис. 1). Однозначно идентифицировать источник этого слоя не удалось. На рис. 3, а видно, что с момента первого извержения вулкана Пинатубо (12 июня) обратная траектория воздушных масс лежит выше 38° с.ш., а с 17 по 30 июня – полностью выше 60° с.ш. Самая нижняя по широте точка траектории ($38,0^\circ$ с.ш., $55,0^\circ$ з.д.) физически не могла быть достигнута продуктами извержений Пинатубо к 15 июня. Это полностью исключает выбросы Пинатубо как источник аэрозольного слоя 2 (рис. 1). Его возможным источником могли быть канадские пожары в начале – середине июня 1991 г., в которых возникли незарегистрированные в тот период времени ругоСbs.

Выраженный аэрозольный слой с двумя максимумами был зарегистрирован лидаром 8 июля (7 июля в 19:00 UTC). Максимумы 3 и 4 располагались в диапазонах высот 14,3–14,8 и 13,4–13,7 км соответственно (рис. 1). Траекторный анализ позволяет заключить, что максимум 4 был образован аэрозолями от двух разных источников – ругоСb от пожаров в Канаде и извержения Пинатубо (рис. 3, б). Действительно, нижняя траектория (13400 м) с 27 июня по 2 июля проходит в стратосфере над территорией Канады и северной частью Атлантического океана, тогда как верхняя траектория (13700 м) с 27 по 30 июня располагается в широтном поясе, в котором аэрозоли после извержения Пинатубо уже присутствовали. Такой же вывод справедлив и для максимума 3 (рис. 3, в). Траектория (14300 м) начинается в стратосфере над Атлантическим океаном,

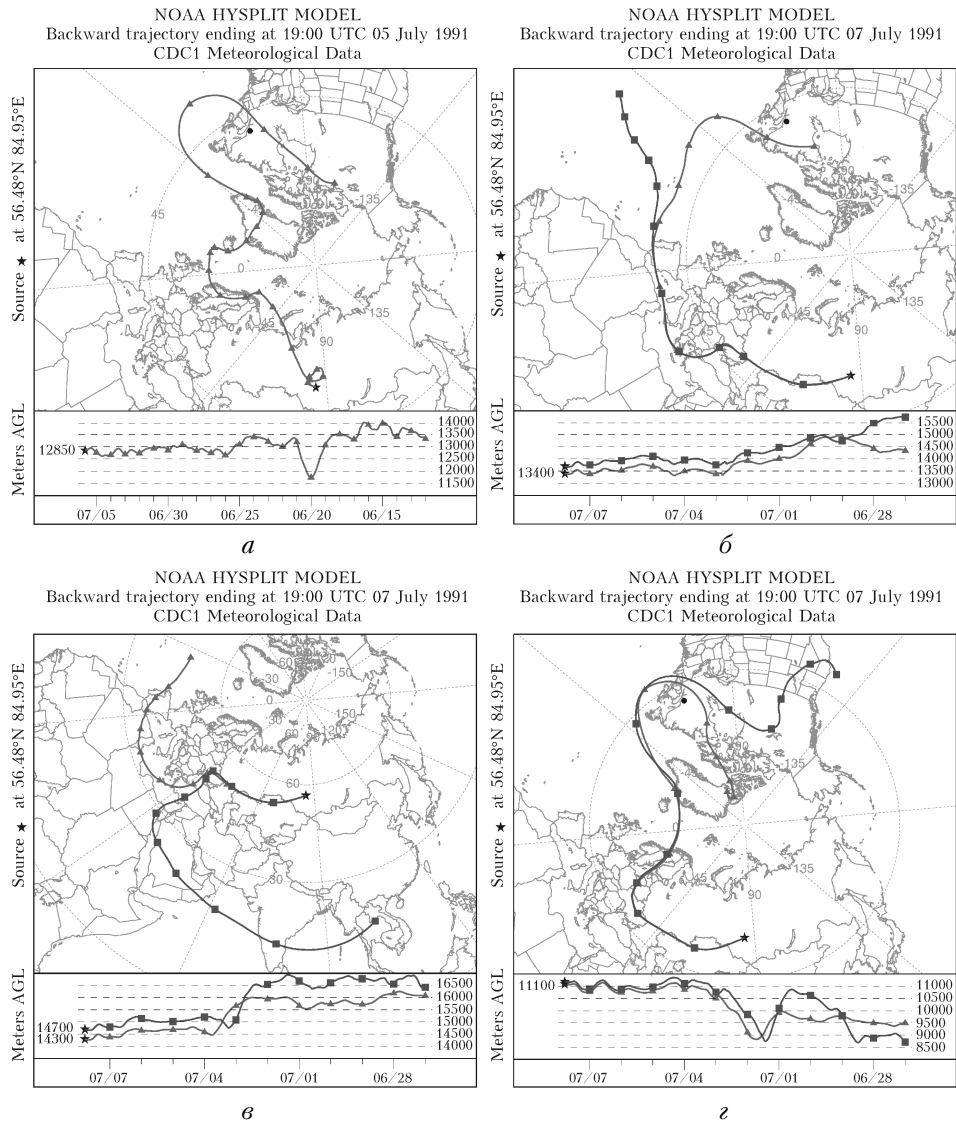


Рис. 3. Обратные траектории воздушных масс, начинающиеся от аэрозольного максимума 2 (*a*) (см. рис. 1), зарегистрированного над г. Томском 6 июля 1991 г. в 02:00 (5 июля в 19:00 UTC); от аэрозольных максимумов 4, 3 и 5 (*б, в и г* соответственно), зарегистрированных 8 июля в 02:00 (7 июля в 19:00 UTC)

где в тот период времени был зарегистрирован шлейф от квебекского ругоСв [15]. Траектория (14700 м) с 27 июня по 2 июля находится в стратосфере в диапазоне широт 10–30° с.ш., который уже был заполнен вулканическим аэрозолем Пинатубо [2–4]. Отметим, что последняя траектория хорошо согласуется с траекторией, приведенной в работе [14]. Таким образом, рассматриваемый слой является суперпозицией дымового шлейфа от указанного ругоСв и следов извержения Пинатубо.

Небольшой максимум 5 также наблюдался 8 июля на высотах 11,1–11,2 км вблизи местной тропопаузы (см. рис. 1). Из траекторного анализа следует, что с 27 июня по 2 июля воздушные массы находились в тропосфере над территорией Северной Америки, где в тот период времени были крупные лесные пожары (рис. 3, *г*). Это позволяет считать, что источником данного аэрозольного слоя были

тропосферные дымовые шлейфы от канадских пожаров и наличие стратосферного ругоСв для образования максимума 5 не требовалось.

Во время лидарных измерений 9 июля 1991 г. (8 июля в 19:00 UTC) в стратосфере над г. Томском были зарегистрированы, предположительно, два аэрозольных слоя (см. рис. 1) [13, 14]. Максимум 6 верхнего слоя наблюдался на высоте около 19 км. Траекторный анализ не позволил идентифицировать его источник (рис. 4, *a*). Однако можно утверждать, что ни ругоСв от 19 июня, ни выбросы Пинатубо не могли быть причиной появления данного слоя. Нижний слой наблюдался в диапазоне высот от 11 до 16,5 км и имел три выраженных максимума (см. рис. 1). Для удобства анализа мы формально разбили этот слой на три составляющие. Самый мощный аэрозольный слой с $R(H) = 2,7$ был зарегистрирован в высотном диапазоне 14,5–17,0 км с максимумом 7

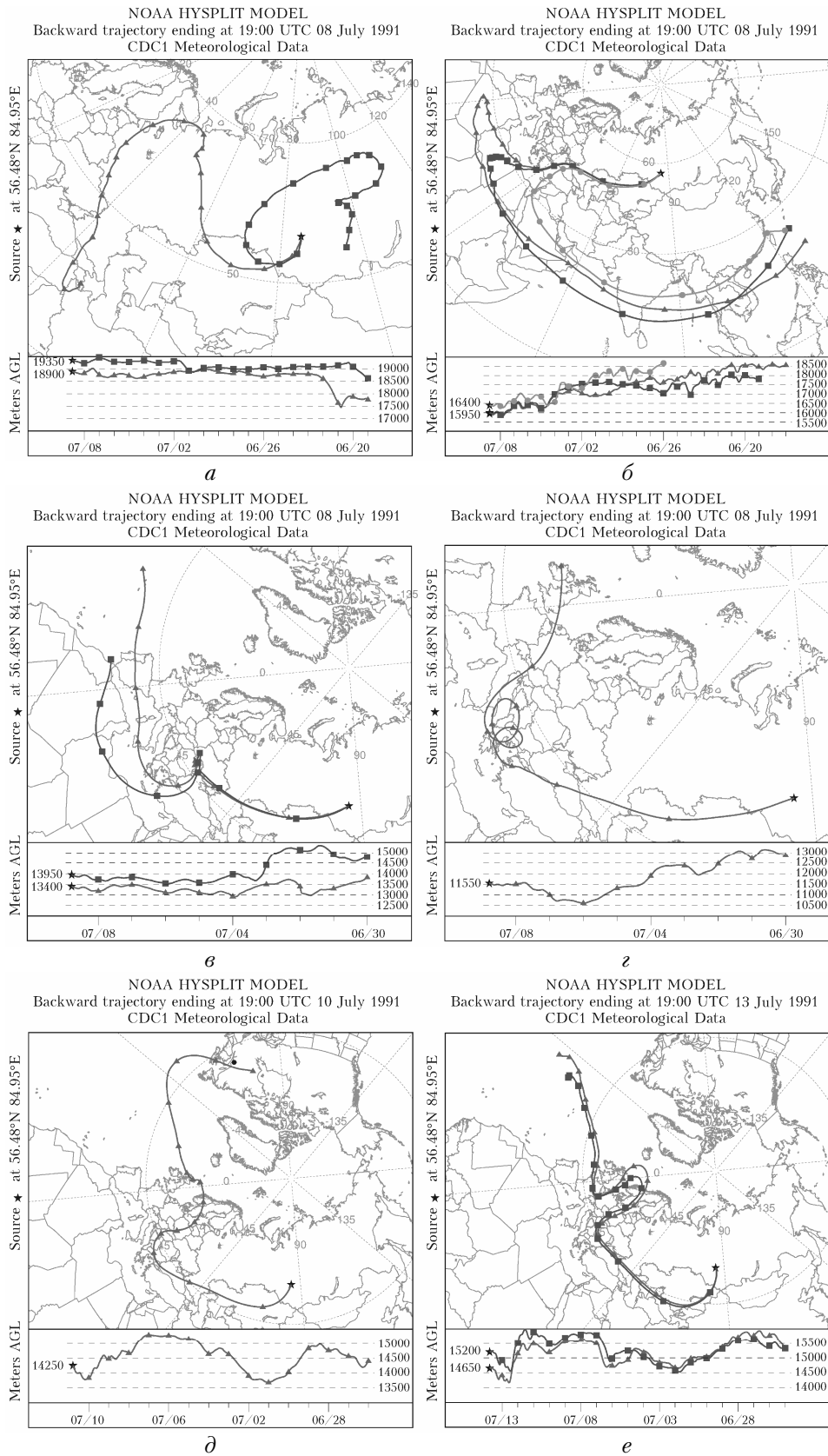


Рис. 4. Обратные траектории воздушных масс, начинающиеся от аэрозольных максимумов 6, 7, 8 и 9 (*a*, *б*, *в* и *г* соответственно) (см. рис. 1), зарегистрированных над г. Томском 9 июля 1991 г. в 02:00 (8 июля в 19:00 UTC); от максимума 10 (*д*), зарегистрированного 11 июля в 02:00 (10 июля в 19:00 UTC); от максимума 11 (*е*), зарегистрированного 14 июля в 02:00 (13 июля в 19:00 UTC)

около 16,0 км (см. рис. 1). Результаты траекторного анализа приводят к заключению, что его источником являлось извержение Пинатубо (рис. 4, б), поскольку воздушные массы попали в стратосферу над г. Томском из стратосферы тропических широт (10–30° с.ш.), заполненной вулканическим аэрозо-лем [2–4]. Отметим, что полученный вывод в указанном случае полностью согласуется с выводами работ [13, 14].

Источник аэрозольного слоя на высотах 13,0–14,5 км с максимумом 8 около 13,5 км из траекторного анализа однозначно не определяется (см. рис. 1). Обе траектории (13400 и 13950 м) лежат выше 30° с.ш., причем первая из них проходит в стратосфере на Европой, где в начале июля были отмечены следы от квебекского ругоСб (рис. 4, в). Однако вторая траектория (13950 м) проходит 1–2 июля близко к 30° с.ш. над южной частью Туниса, где через две недели после извержения Пинатубо могли оказаться его аэрозольные следы. На рис. 4, г показана обратная траектория движения воздушных масс от слоя с максимумом 9 на высоте ~11,6 км. Хорошо видно, что 1–2 июля траектория проходит в стратосфере над Германией и Италией, где в тот период времени лидарами регистрировались выраженные аэрозольные слои, пришедшие из Канады [15]. Следовательно, источником этого слоя мог быть стратосферный дымовой шлейф от квебекского ругоСб.

Незначительный аэрозольный слой с максимумом 10 на высоте около 14,2 км наблюдался в стратосфере над г. Томском 11 июля (10 июля в 19:00 UTC) (см. рис. 1). На рис. 4, д видно, что траектория начинается в стратосфере над Канадой недалеко от места образования ругоСб, проходит над северной частью Атлантического океана и с 1 по 5 июля находится в стратосфере над северной частью Европы, где в это время, согласно [15], находился дымовой шлейф от ругоСб. Это указывает на ругоСб как на наиболее вероятный источник аэрозольного слоя 10.

Выраженный аэрозольный слой с $R(H) = 2,2$ был зарегистрирован над г. Томском 14 июля (13 июля в 19:00 UTC) в высотном диапазоне 13,0–16,0 км с максимумом 11 на 14,5 км (см. рис. 1). Траекторный анализ показал, что данный слой представляет собой суперпозицию шлейфа от квебекского ругоСб и аэрозолей Пинатубо (рис. 4, е). Согласно [4] воздушные массы (как и в случае аэрозольного слоя с максимумом 8), начав движение 25 июня от ~30° с.ш., могли содержать следы извержения Пинатубо. Обе траектории с 30 июня по 5 июля проходили над севером Европы в стратосфере, содержащей дымовой шлейф от ругоСб из Канады.

Заключение

В работе пересмотрены результаты лидарного зондирования аэрозоля в стратосфере над г. Томском с 29 июня по 14 июля 1991 г., первоначально определенные как аэрозольные слои вследствие извержения вулкана Пинатубо [13, 14]. Необходимость

в ревизии результатов спустя 27 лет после их получения возникла по двум основным причинам. Во-первых, в дополнение к вулканическим извержениям был установлен еще один источник аэрозоля, способный вызвать сильные возмущения стратосферы в масштабах полушария – пирокумулятивные облака. Во-вторых, ревизия результатов зондирования от 1 июля 1991 г. на трех более низкоширотных станциях в Италии, Франции и Германии показала, что источником зарегистрированных аэрозольных слоев было пирокумулятивное облако, сформировавшееся в провинции Квебек (Канада) 19 июня 1991 г. в результате крупных лесных пожаров [15].

С помощью траекторной модели NOAA HYSPLIT было сопоставлено 11 максимумов стратосферных аэрозольных слоев, наблюдавшихся над г. Томском в указанный период, с их потенциальными источниками (см. рис. 1). Траекторный анализ показал: 1) наиболее вероятный источник максимумов 1, 9 и 10 – дымовой шлейф от квебекского ругоСб; 2) извержения вулкана Пинатубо были однозначной причиной появления над г. Томском самого мощного максимума 7; 3) максимумы 3, 4 и 11 представляли собой суперпозицию дымового шлейфа от указанного ругоСб и первых следов извержения вулкана Пинатубо; 4) источником максимума 5 могли быть тропосферные дымовые шлейфы от лесных пожаров в Канаде. Однозначно идентифицировать источники максимумов 2, 6 и 8 не удалось.

Таким образом, на примере г. Томска показано, что при определении источников аэрозольных слоев в стратосфере (даже при наличии в ней аэрозоля после крупных извержений вулканов) необходимо отслеживать в течение минимум 2–3 недель до даты измерений наличие ругоСбs, появившихся в результате крупных лесных пожаров на территории Северной Америки. Данный вывод полностью согласуется с выводами, сделанными в работе [15] на примере европейских лидарных станций.

При исследовании тропосферных аэрозольных полей, обусловленных дымовыми шлейфами от крупных лесных пожаров [44–47], также необходимо учитывать потенциальное влияние ругоСбs, поскольку они являются мощным источником продуктов горения биомассы и, как было отмечено выше, максимальная высота их выбросов редко выходит за пределы тропосферы [33–37]. Начиная с мая 2013 г. зарегистрированные случаи возникновения ругоСбs отражаются на сайте Кооперативного института метеорологических спутниковых исследований (<http://www.pyrocb.ssec.wisc.edu>).

1. Fierstein J., Hildreth W. The plinian eruptions of 1912 at Novarupta, Katmai National Park, Alaska // Bull. Volcanol. 1992. V. 54, N 8. P. 646–684.
2. McCormick M.P., Veiga R.E. Sage II measurements of early Pinatubo aerosols // Geophys. Res. Lett. 1992. V. 19, N 2. P. 155–158.
3. Stowe L., Carey R.M., Pellegrino P.P. Monitoring the Mt. Pinatubo aerosol layer with NOAA/11 AVHRR data // Geophys. Res. Lett. 1992. V. 19, N 2. P. 159–162.
4. Lambert A., Grainger R.G., Remedios J.J., Rodgers C.D., Corney M., Taylor F.W. Measurements of the evolution

- of the Mt. Pinatubo aerosol cloud by ISAMS // *Geophys. Res. Lett.* 1993. V. 20, N 12. P. 1287–1290.
5. DeFoor T.E., Robinson E., Ryan S. Early lidar observations of the June 1991 Pinatubo eruption plume at Mauna Loa Observatory, Hawaii // *Geophys. Res. Lett.* 1992. V. 19, N 2. P. 187–190.
 6. Post M.J., Grund C.J., Langford A.O., Proffitt M.H. Observations of Pinatubo ejecta over Boulder, Colorado by lidars of three different wavelengths // *Geophys. Res. Lett.* 1992. V. 19, N 2. P. 195–198.
 7. Hayashida S., Sasano Y. Stratospheric aerosol change in the early stage of volcanic disturbance by the Pinatubo eruption observed over Tsukuba, Japan // *Geophys. Res. Lett.* 1993. V. 20, N 7. P. 575–578.
 8. Gobbi G.P., Congeduti F., Adriani A. Early stratospheric effects of the Pinatubo eruption // *Geophys. Res. Lett.* 1992. V. 19, N 10. P. 997–1000.
 9. Chazette P., David C., Lefrere J., Godin S., Pelon J., Mégie G. Comparative lidar study of the optical, geometrical, and dynamical properties of stratospheric post-volcanic aerosols, following the eruptions of El Chichon and Mount Pinatubo // *J. Geophys. Res. D.* 1995. V. 100, N 11. P. 23195–23207.
 10. Jäger H. The Pinatubo eruption cloud observed by lidar at Garmisch-Partenkirchen // *Geophys. Res. Lett.* 1992. V. 19, N 2. P. 191–194.
 11. Sheridan P.J., Schnell R.C., Hofmann D.J., Deshler T. Electron microscope studies of Mt. Pinatubo aerosol layers over Laramie, Wyoming during summer 1991 // *Geophys. Res. Lett.* 1992. V. 19, N 2. P. 203–206.
 12. Woods D.C., Osborn M.T. Twenty-six years of lidar monitoring of northern midlatitude stratospheric aerosols // *Proc. SPIE.* 2001. V. 4168. P. 249–255.
 13. Бурлаков В.Д., Ельников А.В., Зуев В.В., Марищев В.Н., Правдин В.Л. Следы извержения вулкана Пинатубо в стратосфере над Западной Сибирью (Томск, 56° с.ш.) // *Оптика атмосф. и океана.* 1992. Т. 5, № 6. С. 602–604.
 14. Белан Б.Д., Ельников А.В., Зуев В.В., Зуев В.Е., Макенко Э.В., Марищев В.Н. Результаты исследования оптических и микроструктурных характеристик стратосферного аэрозоля методом обращения лидарных измерений в г. Томске летом 1991 г. // *Оптика атмосф. и океана.* 1992. Т. 5, № 6. С. 593–601.
 15. Fromm M., Lindsey D.T., Servranckx R., Yue G., Trickl T., Sica R., Doucet P., Godin-Beekmann S. The untold story of pyrocumulonimbus // *Bull. Am. Meteor. Soc.* 2010. V. 91. P. 1193–1209.
 16. Fromm M.D., Servranckx R. Transport of forest fire smoke above the tropopause by supercell convection // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30, N 10. P. 1542.
 17. Ельников А.В., Креков Г.М., Марищев В.Н. Лидарные наблюдения стратосферного слоя аэрозоля над Западной Сибирью // *Изв. АН СССР. Сер. Физ. атмосф. и океана.* 1988. Т. 24, № 8. С. 818–823; *El'nikov A.V., Krekov G.M., Marichev V.N.* Lidar observations of stratospheric aerosol layer above the western Siberia // *Izv. Acad. Sci. USSR, Atmos. Ocean. Phys.* 1988. V. 24, N 8. P. 818–823.
 18. Stein A.F., Draxler R.R., Rolph G.D., Stunder B.J.B., Cohen M.D., Ngan F. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system // *Bull. Am. Meteor. Soc.* 2015. V. 96. P. 2059–2077.
 19. URL: <http://www.ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php> (last access: 10.12.2017).
 20. Fromm M., Alfred J., Hoppel K., Hornstein J., Bevilacqua R., Shettle E., Servranckx R., Li Z., Stocks B. Observations of boreal forest fire smoke in the stratosphere by POAM III, SAGE II, and lidar in 1998 // *Geophys. Res. Lett.* 2000. V. 27, N 9. P. 1407–1410.
 21. Fromm M., Bevilacqua R., Servranckx R., Rosen J., Thayer J.P., Herman J., Larko D. Pyro-cumulonimbus injection of smoke to the stratosphere: Observations and impact of a super blowup in northwestern Canada on 3–4 August 1998 // *J. Geophys. Res. D.* 2005. V. 110, N 8. P. D08205.
 22. Fromm M., Tupper A., Rosenfeld D., Servranckx R., McRae R. Violent pyro-convective storm devastates Australia's capital and pollutes the stratosphere // *Geophys. Res. Lett.* 2006. V. 33, N 5. P. L05815.
 23. Fromm M., Torres O., Diner D., Lindsey D., Vant Hull B., Servranckx R., Shettle E.P., Li Z. Stratospheric impact of the Chisholm pyrocumulonimbus eruption: 1. Earth-viewing satellite perspective // *J. Geophys. Res. D.* 2008. V. 113, N 8. P. D08202.
 24. Fromm M., Shettle E.P., Fricke K.H., Ritter C., Trickl T., Giehl H., Gerding M., Barnes J.E., O'Neill M., Massie S.T., Blum U., McDermid I.S., Leblanc T., Deshler T. Stratospheric impact of the Chisholm pyrocumulonimbus eruption: 2. Vertical profile perspective // *J. Geophys. Res. D.* 2008. V. 113, N 8. P. D08203.
 25. Livesey N.J., Fromm M.D., Waters J.W., Manney G.L., Santee M.L., Read W.G. Enhancements in lower stratospheric CH₃CN observed by the Upper Atmosphere Research Satellite Microwave Limb Sounder following boreal forest fires // *J. Geophys. Res. D.* 2004. V. 109, N 6. P. D06308.
 26. Damoah R., Spichtinger N., Servranckx R., Fromm M., Eloranta E.W., Razenkov I.A., James P., Shulski M., Forster C., Stohl A. A case study of pyro-convection using transport model and remote sensing data // *Atmos. Chem. Phys.* 2006. V. 6, N 1. P. 173–185.
 27. Cammas J.-P., Brioude J., Chaboureau J.-P., Duron J., Mari C., Mascart P., Nédélec P., Smit H., Pätz H.-W., Volz-Thomas A., Stohl A., Fromm M. Injection in the lower stratosphere of biomass fire emissions followed by long-range transport: A MOZIC case study // *Atmos. Chem. Phys.* 2009. V. 9, N 15. P. 5829–5846.
 28. Gonzi S., Palmer P.I. Vertical transport of surface fire emissions observed from space // *J. Geophys. Res. D.* 2010. V. 115, N 2. P. D02306.
 29. Guan H., Esswein R., Lopez J., Bergstrom R., Warneck A., Follette-Cook M., Fromm M., Iraci L.T. A multi-decadal history of biomass burning plume heights identified using aerosol index measurements // *Atmos. Chem. Phys.* 2010. V. 10, N 14. P. 6461–6469.
 30. Siddaway J.M., Petelina S.V. Transport and evolution of the 2009 Australian Black Saturday bushfire smoke in the lower stratosphere observed by OSIRIS on Odin // *J. Geophys. Res. D.* 2011. V. 116, N 6. P. D06203.
 31. Dahlkötter F., Gysel M., Sauer D., Minikin A., Baumann R., Seifert P., Ansmann A., Fromm M., Voigt C., Weinzierl B. The Pagami Creek smoke plume after long-range transport to the upper troposphere over Europe – aerosol properties and black carbon mixing state // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. V. 14, N 12. P. 6111–6137.
 32. Pauqam R., Wooster M., Freitas S., Val Martin M. A review of approaches to estimate wildfire plume injection height within large-scale atmospheric chemical transport models // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16, N 2. P. 907–925.
 33. Val Martin M., Logan J.A., Kahn R.A., Leung F.-Y., Nelson D.L., Diner D.J. Smoke injection heights from fires in North America: Analysis of 5 years of satellite observations // *Atmos. Chem. Phys.* 2010. V. 10, N 4. P. 1491–1510.
 34. Nikonovas T., North P.R.J., Doerr S.H. Particulate emissions from large North American wildfires estimated using a new top-down method // *Atmos. Chem. Phys.* 2017. V. 17, N 10. P. 6423–6438.

35. Rémy S., Veira A., Paugam R., Sofiev M., Kaiser J.W., Marenco F., Burton S.P., Benedetti A., Engelen R.J., Ferrare R., Hair J.W. Two global data sets of daily fire emission injection heights since 2003 // *Atmos. Chem. Phys.* 2017. V. 17, N 4. P. 2921–2942.
36. Sofiev M., Vankevich R., Ermakova T., Hakkarainen J. Global mapping of maximum emission heights and resulting vertical profiles of wildfire emissions // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13, N 14. P. 7039–7052.
37. Peterson D., Hyer E., Wang J. Quantifying the potential for high-altitude smoke injection in the North American boreal forest using the standard MODIS fire products and subpixel-based methods // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2014. V. 119, N 6. P. 3401–3419.
38. URL: <http://www.glossary.ametsoc.org/wiki/Pyrocumulonimbus> (last access: 10.12.2017).
39. Zuev V.V., Burlakov V.D., Nevozorov A.V., Pravdin V.L., Savelyeva E.S., Gerasimov V.V. 30-year lidar observations of the stratospheric aerosol layer state over Tomsk (Western Siberia, Russia) // *Atmos. Chem. Phys.* 2017. V. 17, N 4. P. 3067–3081.
40. Markowicz K.M., Chilinski M.T., Lisok J., Zawadzka O., Stachlewska I.S., Janicka L., Rozadowska A., Makuch P., Pakszys P., Zielinski T., Petelski T., Posyniak M., Pietruczuk A., Szkop A., Westphal D.L. Study of aerosol optical properties during long-range transport of biomass burning from Canada to Central Europe in July 2013 // *J. Aerosol Sci.* 2016. V. 101. P. 156–173.
41. Ansmann A., Baars H., Chudnovsky A., Mattis I., Veselovskii L., 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, N 16. P. 11831–11845.
42. URL: <https://www.nasa.gov/content/goes> (last access: 10.12.2017).
43. Carnuth W., Kempfer U., Trickl T. Highlights of the tropospheric lidar studies at IFU within the TOR project // *Tellus B.* 2002. V. 54, N 2. P. 163–185.
44. Ситнов С.А., Горчаков Г.И., Свириденков М.А., Горчакова И.А., Картов А.В., Колесникова А.Б. Аэрокосмический мониторинг дымового аэрозоля на европейской части России в период массовых пожаров лесов и торфяников в июле – августе 2010 г. // *Оптика атмосф. и океана.* 2012. Т. 25, № 12. С. 1062–1076; Sitenov S.A., Gorchakov G.I., Sviridenkov M.A., Gorchakova I.A., Kartov A.V., Kolesnikova A.B. Aerospace monitoring of smoke aerosol over the European Part of Russia in the period of massive forest and Peatbog Fires in July–August of 2010 // *Atmos. Ocean. Opt.* 2013. V. 26, N 4. P. 265–280.
45. Суркова Г.В., Блинов Д.В., Кирсанов А.А., Ревокатова А.П., Ривин Г.С. Моделирование распространения шлейфов воздушных загрязнений от очагов лесных пожаров с использованием химико-транспортной модели COSMO-Ru7-ART // *Оптика атмосф. и океана.* 2014. Т. 27, № 1. С. 75–81; Surkova G.V., Blinov D.V., Kirsanov A.A., Revokatova A.P., Rivin G.S. Simulation of spread of air pollution plumes from forest fires with the use of COSMO-Ru7-ART chemical-transport model // *Atmos. Ocean. Opt.* 2014. V. 27, N 3. P. 268–274.
46. Томшин О.А., Соловьев В.С. Исследование крупномасштабных неоднородностей аэрозольных полей, вызванных лесными пожарами в Сибири // *Оптика атмосф. и океана.* 2016. Т. 29, № 7. С. 598–602.
47. Балин Ю.С., Клемашева М.Г., Коханенко Г.П., Насонов С.В., Новоселов М.М., Пеннер И.Э. Лидарные исследования вертикальной структуры аэрозольных полей атмосферы над озером Байкал в период лесных пожаров // *Оптика атмосф. и океана.* 2016. Т. 29, № 8. С. 689–693.

V.V. Gerasimov, V.V. Zuev, E.S. Savelyeva. Traces of Canadian pyrocumulonimbus clouds in the stratosphere over Tomsk in June–July, 1991.

We revise the results of lidar measurements of stratospheric aerosol over Tomsk that were made from June 29 to July 14, 1991, and initially interpreted as aerosol layers after the Pinatubo eruption. Using the NOAA HYSPLIT trajectory model, we show that aerosol layers detected at altitudes of 12 and 14.2 km on June 29 and July 11, respectively, were the stratospheric smoke plume from massive forest fires occurred in Quebec, Canada, in June 1991. Biomass burning products reached the stratosphere via convective ascent within a pyrocumulonimbus (pyroCb) cloud that was detected at 100 km west of Baie-Comeau (Quebec, Canada) on June 19. Aerosol layers observed at altitudes between 11 and 16.5 km on July 8, 9, and 14 represented superpositions of the smoke plume from the Quebec pyroCb and the first traces of the Pinatubo eruption.