

И.Э. Пеннер, Г.П. Коханенко, В.С. Шаманаев

Самолетные исследования аэрозольного следа от отделяемых частей ракеты-носителя

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 22.10.2001 г.

Проведено исследование искусственного аэрозольного облака, образовавшегося выше тропопаузы при выбросе из падающей ступени ракеты-носителя компонентов ракетного топлива. Определены геометрические размеры, коэффициент рассеяния и направление движения этого антропогенного облака.

Известно, что при запусках ракет-носителей в отработавших и отделенных ступенях остается некоторый гарантийный запас топлива (гептил, или несимметричный диметилгидразин) и окислителя (азотный тетраоксид). Остатки компонентов топлива могут составлять несколько сотен килограммов. В процессе их принудительного выдавливания из баков и возможного разрушения второй ступени в момент вхождения в плотные слои атмосферы оба компонента попадают в атмосферу и рассеиваются в ней [1].

В силу высокой токсичности компоненты ракетного топлива (КРТ) и продукты их распада в атмосфере являются источником опасного загрязнения окружающей среды. В связи с этим немаловажное значение имеют экспериментальные данные о моменте появления и поведении КРТ в атмосфере. В настоящее время имеющиеся модели распространения и седиментации аэрозольных КРТ содержат значительный произвол в начальных условиях [2]. В этом отношении наиболее полная информация могла бы быть получена при зондировании КРТ лидаром с борта самолета.

Такой эксперимент был проведен 16 июня 2001 г. во время одного из запусков с космодрома Байконур ракеты-носителя «Протон-К». Самолет-лаборатория АН-30 «Оптик-Э» [3] барражировал на высоте 7 км в предполагаемом районе падения второй ступени (к юго-востоку от оз. Телецкое Алтайского края). След выброса КРТ и падающие остатки второй ступени были визуально обнаружены в 06:01 московского времени в направлении северо-запада от прогнозируемого места падения. Согласно расчетной траектории падения к этому моменту времени вторая ступень должна была находиться на высоте порядка ~ 13 км. Видимый облакообразный шлейф выбросов КРТ находился выше этой высоты и, как показали дальнейшие наблюдения, в течение 30 мин не опускался ниже. Лидар, ориентированный на горизонтальные трассы зондирования с борта самолета, к сожалению, не мог попасть в шлейф, находящийся на таких высотах, и исследовал только безоблачную атмосферу.

Поэтому дальнейшие исследования проводились по результатам видеосъемки и визуальных оценок.

На рис. 1 приведены маршрут полета самолета с временной привязкой наблюдений; баллистическая траектория падения второй ступени; оценка района нахождения аэрозольного шлейфа в проекции на поверхность Земли, выполненная на основе триангуляционных засечек штурманскими приборами самолета в течение примерно 35 мин. Как видно, для падающей ступени имело место значительное отклонение от расчетной траектории. По предварительным данным телеметрии, избыток гептила был принудительно выведен из топливных баков на высотах порядка 40 км. Видимый шлейф на нижележащих высотах (ориентировочно на 20–10 км) образован, скорее всего, истечением окислителя из разрушающихся топливных баков второй ступени. Как показывают метеоданные, приведенные в табл. 1, наличие выраженной температурной инверсии на высотах от 11 до 14 км создавало устойчивое состояние атмосферы на уровне тропопаузы. В отличие от предполагаемой модели распространения шлейфа [2] образовавшееся аэрозольное облако сосредоточилось над тропопаузой. В процессе наблюдения оно вытягивалось и смещалось по горизонту над уровнем тропопаузы по направлению ветра на этих высотах.

На рис. 2 показаны в черно-белом варианте отдельные видеок cadры шлейфа. Рис. 2,а соответствует моменту наблюдения непосредственно сразу после возникновения шлейфа в 06:01:30. Здесь поле зрения камеры фиксировано и известно, поэтому удалось оценить размеры шлейфа. Анализ маршрутной прокладки по данному рис. 1 позволяет заключить, что для кадра рис. 2, а расстояние от самолета до шлейфа составляло (45 ± 5) км. В этом случае наклонная длина центральной, наиболее яркой части шлейфа равна 4,5–5 км. Ее толщина («диаметр») примерно 0,8–1,0 км. Угол наклона шлейфа в данной проекции близок к 30° от вертикали. Анализ неконтрастной части цветного изображения показывает, что в этот момент вверх от

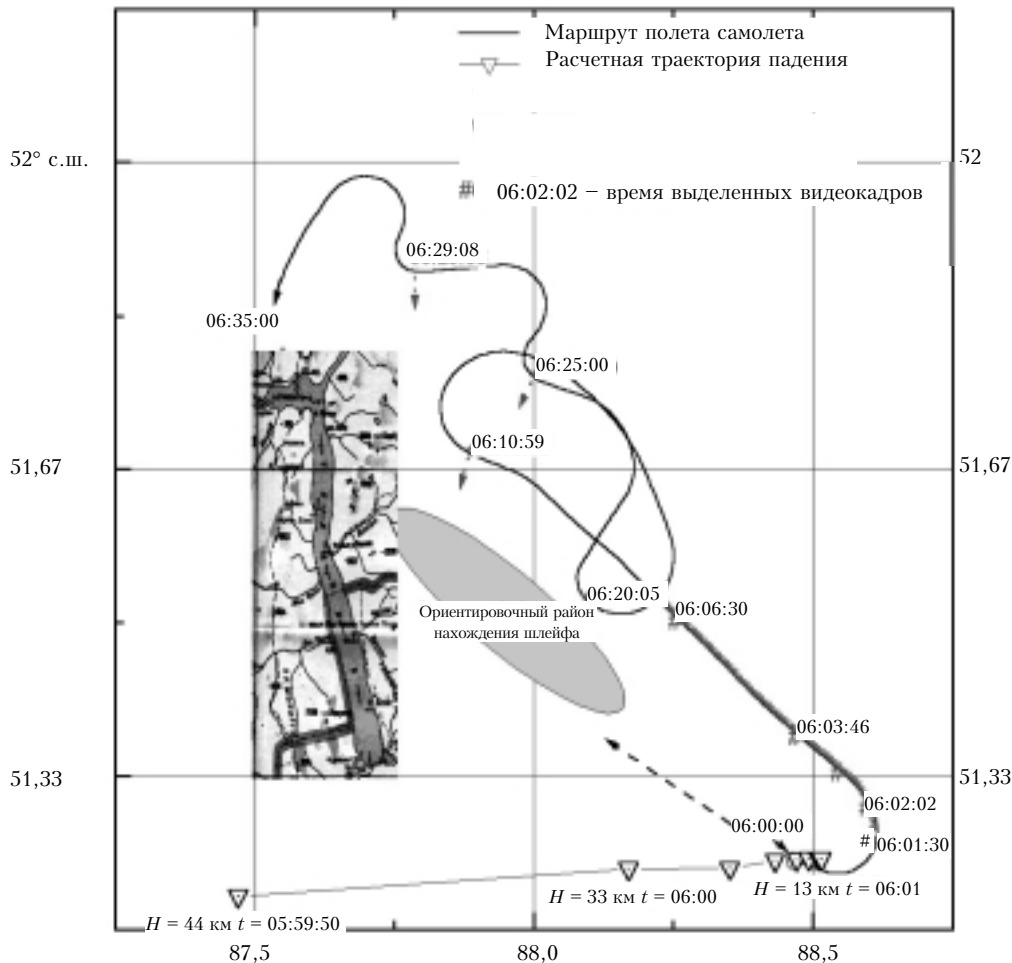


Рис. 1. Схема маршрута самолета. Координаты района указаны в географических градусах. На маршруте указано московское время прохождения самолетом выделенных точек, слева – фрагмент карты района Телецкого озера

Таблица 1

Метеоинформация по пункту высотного радиозондирования атмосферы г. Новосибирска от 16.06.2001 в 00:00:00 ч по гринвичскому времени

Высота H , м	Температура t , °C	Скорость ветра V , м/с	Направление ветра, град
0	16,8	1	120
1006	14,4	5	190
5650	-14,7	11	245
7206	-28,8	13	215
8812	-37,7	12	245
9320	-43,3	13	240
10520	-53,7	13	225
11167	-55,5	13	250
11727	-54,4	14	260
13820	-47,7	9	260
15087	-49,9	5	280
15812	-50,5	6	280
16470	-51,9	5	270

центрального ядра простирается слабый след длиной 3–4 км. Еще более слабый след имеется снизу ядра, приблизительно на 1–2 км. Предположительно, он проникает в тропопаузу за счет динамических процессов от падения ступени. На рис. 2, б хорошо видно

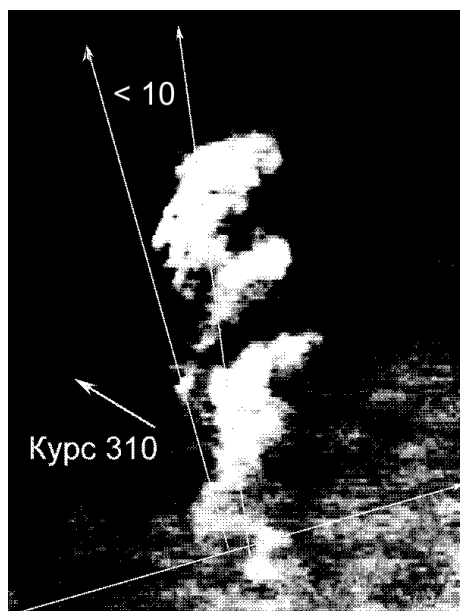
спиральное строение шлейфа, но оценить здесь его размеры нельзя, так как трансфокатор камеры был в одном из промежуточных положений. Эта спираль, вернее, штопор, связана с тем, что сам корпус второй ступени при падении вращается по образующей конуса. Толщина струи аэрозоля, из которой состоит фигура штопора, равнялась в первые моменты 100–200 м.

Несколько неоднозначной получается оценка высоты нахождения видимой части шлейфа. Это связано с погрешностями определения ориентации камеры и дальности до шлейфа. В первом приближении можно просто привязать нижнюю границу шлейфа (считая его форму «бочкой» либо «веретенком») к тропопаузе. В этом случае в начальный момент наблюдения ядро располагается на высотах от 11 до 15–16 км.

При дальнейшей обработке по видеокадрам оценивалась яркость отдельных участков изображения в начальной стадии процесса диссипации шлейфа, когда концентрация вещества в нем максимальная. Сравнивались спектральные яркости наиболее яркого участка шлейфа $B_{ш}$ и расположенного рядом (на этой же угловой высоте) участка неба такой же площади B_a . Влиянием на условия освещенности облаков и подстилающей поверхности можно пренебречь.



a



б

Рис. 2. Изображения облака аэрозоля на основе тетраоксида азота в первые минуты его существования: *a* – фиксированное поле зрения видеокамеры; *б* – увеличенное изображение облака в другом ракурсе

Величины $V_{ш}/V_a$ вычислялись для красного, зеленого и синего диапазонов спектра видимого излучения. В табл. 2 приведены средние значения $V_{ш}/V_a$ для временного ряда видеокadres от 06:02:57 до 06:06:35. Отметим, что за эти несколько минут измерений какой-либо закономерности в изменении значений $V_{ш}/V_a$ не отмечалось.

Можно сказать, что шлейф несколько более красный, чем окружающая его атмосфера, хотя визуально он был белым, напоминая обычное облако. Эта красноватость является значимой, так как доверительные интервалы цветности не перекрываются. Причиной

этого явления может быть наличие в шлейфе окислов азота, имеющих, как известно, красно-бурый цвет. С другой стороны, могут сказываться различия спектрального светорассеяния для естественной аэрозольно-молекулярной атмосферы на высотах порядка 12–15 км и антропогенного аэрозоля из частичек (капель или кристаллов) обводненной четырехоксида азота или продуктов ее разложения.

Таблица 2

Отношение яркости шлейфа к фоновой яркости атмосферы

Диапазон спектра	$V_{ш}/V_a$
Красный	$1,664 \pm 0,117$ (7%)
Зеленый	$1,458 \pm 0,10$ (7%)
Синий	$1,378 \pm 0,054$ (4%)

Дальнейший анализ изображений был проведен в предположении, что яркость шлейфа $V_{ш}$ и соседнего участка неба V_a просто пропорциональны их оптической толщине, так как условия освещения их Солнцем одинаковы, т.е. $V_{ш} = \tau_{ш} I_c$ и $V_a = \tau_a I_c$, где I_c – интенсивность солнечного освещения. Геометрический «диаметр» центральной бочкообразной части шлейфа был оценен нами выше, приблизительно в $d = 0,9$ км. Соответственно, $\tau_{ш} = d \sigma$, где σ – средний коэффициент рассеяния излучения в этом сечении шлейфа.

Сложнее обстоит дело с оптической толщиной чистой атмосферы τ_a . Необходимо оценить ее от высоты 7 км над Землей (эшелон полета самолета) вверх и в направлении около 30° к горизонту. За основу для оценки была взята монография [4], где на базе экспериментальных и расчетных данных синтезирована оптическая модель атмосферы, пригодная для работы с лазерными локаторами. Модель учитывает неоднородную по высоте стратификацию континентальной атмосферы для широкого набора длин волн.

Нами были использованы из нее данные по атмосферной оптической толщине τ_a начиная от некоторой высоты над Землей H и до границы оптически активного слоя высотой 30 км. Длина волны нами использована 0,53 мкм: и как длина волны лазера, и как центр полосы видимого диапазона излучения. В соответствии с [4] в зенитном направлении при нахождении самолета на высоте 7 км, как в нашем случае, $\tau(H, \infty)$, т.е. вертикальная оптическая толщина $\tau_{a, \text{зенитное}} = 3,69 \cdot 10^{-2}$. Угол места видеокамеры при визировании ядра шлейфа был около 30° . Таким образом, при учете значения $\sin 30^\circ$ наклонная оптическая толщина $\tau_a = 7,38 \cdot 10^{-2}$.

По данным табл. 2 можно принять, что соотношение яркостей шлейфа и аэрозольно-молекулярной атмосферы в зеленом диапазоне излучения $V_{ш}/V_a = 1,5$, т.е. $\sigma_{ш} d / 7,38 \cdot 10^{-2} = 1,5$. С учетом того, что, по нашей оценке, $d = 0,9$ км, получаем $\sigma_{ш} = 0,12 \text{ км}^{-1}$. Напомним, что эта центральная часть шлейфа первоначально имела спиральное, вернее, штопорное строение. В таком случае в остальных частях шлейфа $\sigma < 0,1 \text{ км}^{-1}$. Это приблизительно в 30–50 раз больше, чем для

естественной атмосферы на высотах 13–14 км, и находится вполне в границах физически обоснованного здравого смысла.

Таким образом, по результатам данного эксперимента можно сделать следующие выводы.

Большая часть выброса компонентов ракетного топлива не достигает поверхности Земли в местах падения второй ступени, а задерживается выше тропопаузы.

Непосредственно после выброса аэрозольное облако, сформировавшееся из азотного тетраоксида, можно аппроксимировать близким к вертикальному цилиндром высотой 4–6 км (а с хвостами и больше) и диаметром 1 км.

Коэффициент рассеяния излучения такого кислотного антропогенного облака имеет порядок $0,1 \text{ км}^{-1}$.

1. Григорьев С.И., Позин А.А., Шереметьев В.М., Шидловский А.А., Юнак А.И. Направление сотрудничества с

зарубежными партнерами по изучению загрязнения атмосферы и околоземного пространства в процессе запуска ракет и функционирования космических объектов // Вопросы физики атмосферы. СПб.: Гидрометеоздат, 1998. С. 393–407.

2. Садовский А.П., Рапута В.Ф., Олькин С.Е., Зыков С.В., Резникова И.К. К вопросу об аэрозолировании гептила в районах падения отделяемых частей ракет-носителей // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 13. № 6–7. С. 672–677.

3. Зувев В.Е., Белан Б.Д., Кабанов Д.М., Ковалевский В.К., Лукьянов О.Ю., Мелешкин В.Е., Микушев М.К., Панченко М.В., Пеннер И.Э., Покровский Е.В., Сакерин С.М., Терпугова С.А., Толмачев Г.Н., Тумаков А.Г., Шаманаев В.С., Щербатов А.И. Самолет-лаборатория АН-30 «Оптик-Э» для экологических исследований // Оптика атмосф. и океана. 1992. Т. 5. № 10. С. 1012–1021.

4. Креков Г.М., Рахимов Р.Ф. Оптико-локационная модель континентального аэрозоля. Новосибирск: Наука, 1982. 199 с.

I.E. Penner, G.P. Kokhanenko, and V.S. Shamanaev. Aircraft studies of aerosol trail from detachable stages of a carrier-rocket.

A study of an artificial aerosol cloud, formed above tropopause at emission of propellant components from a falling expendable stage of a rocket-carrier, was conducted. The scattering coefficient, geometry, and direction of movement of that anthropogenic cloud were determined.