



УДК 533.951

## ОСОБЕННОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ, СВЯЗАННЫЕ С РАБОТОЙ ТВЕРДОТОПЛИВНЫХ РАКЕТ В ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЕ

Ю.В. Платов<sup>1</sup>, С.Ш. Николайшвили<sup>2</sup>, В.В. Алпатов<sup>2</sup>, А.Н. Беляев<sup>2</sup>, В.Ю. Ключников<sup>3</sup>,  
С.И. Козлов<sup>4</sup>, А.Н. Омельченко<sup>2</sup>, А.Ю. Репин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт земного магнетизм, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова, РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт прикладной геофизики им. академика Е.К. Федорова, Москва, Россия

<sup>3</sup> Московский авиационный институт (НИУ), Москва, Россия

<sup>4</sup> Институт динамики геосфер им. академика М.А. Садовского, РАН, Москва, Россия

Рассматриваются специфические оптические явления в верхних слоях атмосферы, связанные с запусками мощных твердотопливных ракет. Наблюдается сферическая симметрия газопылевых образований, имеющих форму расширяющегося "бублика" в плоскости изображения, и образование области с интенсивным сине-зеленым (бирюзовым) свечением, наблюдаемое в сумеречных условиях в области полета ракеты. Развитие газопылевых облаков, возникающих при разделении ступеней твердотопливных ракет в верхних слоях атмосферы, можно описать моделью сильного взрыва в разреженной среде. При разделении ступеней ракеты в верхней атмосфере наблюдаются облака, имеющие спиральную структуру, что определяется вращением ракеты вокруг продольной оси и истечением продуктов горения через дренажные отверстия в корпусе ракеты. Бирюзовое свечение, наблюдаемое в зоне полета твердотопливных ракет, возникает в результате резонансного рассеяния солнечного излучения молекулами АЮ, образующимися при взаимодействии металлического алюминия, входящего в состав топлива, с атмосферными компонентами и продуктами сгорания.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ВЕРХНИЕ СЛОИ АТМОСФЕРЫ, РАКЕТЫ НА ТВЕРДОМ ТОПЛИВЕ, ОПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ, ГАЗОПЫЛЕВОЕ ОБЛАКО, СФЕРИЧЕСКИЕ И СПИРАЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ ОБЛАКОВ ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ, БИРЮЗОВОЕ СВЕЧЕНИЕ.

DOI: 10.54252/2304-7380\_2021\_31\_17

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Оптические явления в атмосфере Земли в основном связаны с рассеянием излучения на различных компонентах атмосферы. Большинство таких явлений наблюдаются в нижних, наиболее плотных слоях атмосферы. С увеличением высоты плотность и, следовательно, концентрация рассеивающих частиц быстро уменьшается, поэтому интенсивность рассеянного излучения и связанных с ним явлений относительно невелика. Например, яркость радуги или гало достаточна, чтобы подобные явления были видны невооруженным глазом в дневных условиях, тогда как серебристые облака наблюдаются только в сумерках, когда наиболее плотные слои атмосферы оказываются в области земной тени и яркость неба уменьшается более чем в  $10^7$  раз.

К оптическим явлениям на высотах более 90 км, доступным для визуальных наблюдений можно отнести полярные сияния, метеорные явления, а также такие достаточно редкие явления, связанные с электрическими разрядами, как джеты и спрайты (см. рис.1). В этом же высотном диапазоне наблюдается собственное свечение атмосферы, инициированное различными физико-химическими процессами, причем интенсивность излучения может быть достаточно высока. Но визуальные наблюдения собственного свечения атмосферы (эмиссионные слои на высотах

90 – 400 км [1] возможны только из космоса. Для наземных наблюдений таких явлений необходимо применение высокочувствительной аппаратуры [2].

С середины прошлого века в верхней атмосфере Земли стали наблюдаться оптические явления, сопровождающие техническую деятельность человечества в околоземном пространстве – запуски ракет. Эти явления достаточно необычны, поскольку не имеют природных аналогов, и, вероятно, именно по этой причине до сих пор нередко воспринимаются очевидцами как нечто аномальное.

а)



б)



в)

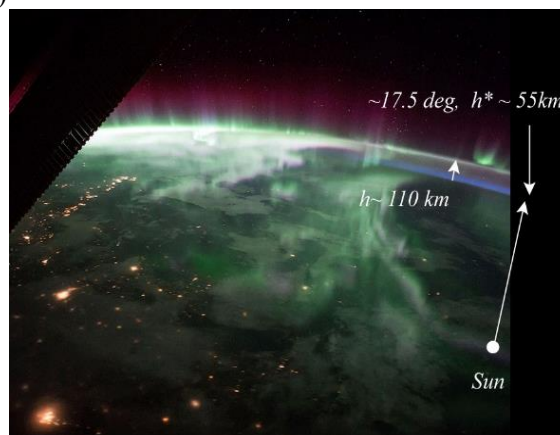


Рис. 1. а) серебристые облака, б) «спрайты» – электрические разряды в ионосферу, в) полярное сияние и эмиссионные слои, зарегистрированные над Канадой с МКС

Оптические явления, связанные с работой ракетно-космической техники, могут быть разделены на несколько категорий [3, 4].

- факел ракетных двигателей;
- дымовые следы в атмосфере;
- свечение, вызванное сгоранием фрагментов ракетной техники в плотных слоях атмосферы;
- свечение газопылевых облаков, образованных компонентами и продуктами сгорания ракетного топлива;
- излучение, возбуждаемое взаимодействием продуктов сгорания ракетного топлива с компонентами верхней атмосферы.

Факел двигателей ракеты, как и дымовой след в нижних слоях атмосферы [5] – самые тривиальные явления и, как правило, их интерпретация не вызывает никаких проблем. На рисунке 2 в качестве примера приведена фотография факела ракеты-носителя Сатурн (фотография сделана во время запуска космического корабля Аполлон 11 в 1969 г.)



Рис. 2. Факел ракеты-носителя Сатурн 5

Очевидно, что самая яркая часть факела ракетного двигателя соответствует высокотемпературной области вблизи сопла. Мощность излучения такого источника для тяжелых ракет в оптическом диапазоне может превышать 1 Мвт, а его яркость составляет  $\sim 3 \cdot 10^6$  кд·м<sup>-2</sup>, (для сравнения – яркость дневного неба в зависимости от условий освещенности может составлять  $\sim 8000$  кд·м<sup>-2</sup>, поэтому подобные объекты могут наблюдаться визуально с расстояний более 1000 км.

Вероятно, единственные явления из рассматриваемых, которые имеют природный аналог в виде метеорных явлений, наблюдаются при вхождении космических аппаратов в плотные слои атмосферы [6] (рис. 3).

а)



б)



в)



Рис. 3. а) Витимский (г. Витим) болид 24.09.2002 г., б) вхождение КА «Жюль Верн» в плотные слои атмосферы, в) бесцелевой спектр головной части изображения – интенсивное свечение в синей области спектра свидетельствует об очень высокой температуре в головной части этого явления

В отличие от метеоров, космические аппараты при вхождении в атмосферу разрушаются на множество фрагментов, что выглядит как полет не одного, а целого «роя» мелких объектов.

Оптические эффекты в верхней атмосфере, сопровождающие запуски жидкостных и твердотопливных ракет во многом подобны, поскольку и те, и другие связаны с выбросом продуктов сгорания и их взаимодействием с компонентами атмосферы. При этом в верхней атмосфере в сумеречных условиях наблюдаются крупномасштабные газопылевые облака, образованные продуктами сгорания ракетного топлива.

Свечение таких образований в основном определяется рассеянием солнечного света на дисперсной компоненте продуктов сгорания, но при работе жидкостных двигателей дисперсные

частицы образуются в результате конденсации паров воды и углекислого газа в выхлопной струе двигателя, а в продуктах сгорания твердого топлива дисперсные частицы присутствуют изначально.

В таблице приведен состав и количество продуктов сгорания вторых ступеней жидкостной РН «Союз» и твердотопливной РН «Старт», выбрасываемых в интервале высот 100 – 150 км.

Таблица.

Компонента	РН «Союз»	РН «Старт»
H <sub>2</sub>	~1%	~1 %
H <sub>2</sub> O	~27%	
CO	~34%	~30%
CO <sub>2</sub>	~38%	~2%
N <sub>2</sub>		~13%
NO <sub>2</sub>		
NO		~1%
Cl <sub>2</sub>		~10%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		~39%
H <sub>2</sub> O+CO <sub>2</sub>	~65%	~6%
Масса продуктов сгорания, инжектируемая в атмосферу в единицу времени (кг/с)	~330	~175

Из таблицы видно, что продуктов сгорания, которые могут образовывать конденсированную фазу (вода и углекислый газ) в выхлопе твердотопливных двигателей в процентном отношении почти в 10 раз меньше, чем в жидкостных двигателях, а в абсолютных значениях (для приведенных ракет) масса отличается более чем в сто раз.

В выхлопе твердотопливных двигателей основная масса дисперсных частиц представлена частицами окиси алюминия Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Молярная масса этих частиц (102) значительно превышает молярную массу воды H<sub>2</sub>O (18) и углекислоты CO<sub>2</sub> (44), но, поскольку при этом большая часть окиси алюминия находится не в молекулярном, а в дисперсном состоянии [7], то общее количество частиц в выхлопе твердотопливных двигателей на несколько порядков меньше, чем в выхлопе жидкостных двигателей сравнимой мощности.

Масса воды, выбрасываемая за 1 сек РН «Союз», составляет ~90 кг. Около 10% от этой величины [8, 9], сконденсированные в частицы с характерным размером ~100 Å [10, 11], составят ансамбль из ~10<sup>22</sup> частиц.

Масса частиц окиси алюминия с характерным размером ~1 мкм ~3·10<sup>-15</sup> кг, а общее количество частиц составляет ~3·10<sup>16</sup>. В релеевском приближении интенсивность излучения *I*, рассеянного на мелких дисперсных частицах, пропорциональна их количеству *N* и квадрату объема *V*: *I*~*NV*<sup>2</sup>. Из приведенных оценок следует, что интенсивность солнечного света, рассеянного на продуктах сгорания, выбрасываемых при работе двигателей различных типов ракет, отличается всего в несколько раз, т. е. при подходящих условиях освещенности такие явления могут наблюдаться при запусках обоих типов ракет.

Следует заметить, что, поскольку оценки количества дисперсных частиц и особенно их размеров весьма неопределенны, полученные соотношения имеют лишь качественный характер и могут отличаться от реальных значений на порядки величин. Действительно, интенсивность рассеянного света пропорциональна квадрату объема частиц, т. е. ~ 6 степени их характерного размера, и ошибка в определении размера частиц в два раза может приводить к ошибке в интенсивности рассеянного света в ~ 50 раз.

Тем не менее очевидно, что общим механизмом свечения облаков продуктов сгорания как жидкостных, так и твердотопливных ракет в верхней атмосфере является рассеяние солнечного света на дисперсной компоненте продуктов сгорания (рис. 4).

Однако имеется определенный тип явлений, присущий исключительно запускам твердотопливных ракет, что определяется особенностями режима работы их двигателей и составом компонент топлива [12].

а)



б)



Рис. 4. Газопылевые следы РН «Союз» (а) и РН «Тополь» (б)

## 2. СЛЕДЫ РАКЕТ В НИЖНЕЙ И СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЕ

«Дымовые» следы твердотопливных ракет в нижних и средних слоях атмосферы при достаточно хороших погодных условиях могут наблюдаться до высот ~100 км.

а)



б)



Рис. 5. Размытие газопылевого следа твердотопливной ракеты Минитмен при запуске с полигона Ванденберг (а); размытый ветром газопылевой след над Кольским полуостровом (б)

После старта ракеты в нижней и средней атмосфере остается след в виде вытянутой вдоль траектории полета дымной полосы, состоящей из продуктов сгорания ракетного топлива и продуктов конденсации паров воды в атмосфере. Со временем газопылевой след, оставленный в атмосфере ракетой, размывается в результате действия двух основных процессов – ветра на разных высотах в атмосфере и диффузионного расширения (рис. 5).

Моделирование этого процесса сводится к решению задачи диффузии облака пассивной примеси, в начальный момент имеющей трехмерное гауссово распределение относительно своего центра с коэффициентами диффузии, зависящими от времени и высоты. Подробно эта задача была рассмотрена в работах [13, 14]. Интенсивность диффузионного рассеяния ракетного следа максимальна в верхней стратосфере, а минимальна в нижней стратосфере и тропосфере.

На всех высотах от тропосферы до мезосферы присутствуют так называемые высотные струйные течения (ВСТ) – сильные ветра в виде узких воздушных потоков, для которых характерны большие скорости (до 300 км/час) и градиенты скоростей (более 10 м/с на 1 км по высоте). Эти течения являются звеньями общей зональной циркуляции атмосферы, связаны с высотными фронтальными зонами и имеют эллиптическое по форме поперечное сечение. Размеры ВСТ по горизонтали – сотни километров в ширину и тысячи километров в длину, по вертикали – до 4 км. Скорости ветра в ВСТ изменяются вдоль струи, причем очаги максимальных скоростей на их оси перемещаются по ветру. В зависимости от сезона, времени запуска и географического положения космодрома влияние таких течений на форму ракетного следа может быть как весьма незначительным, так и чрезвычайно масштабным, как это видно на рис.5б. Очевидно также, что наблюдения таких явлений с хорошим временным разрешением может служить инструментом в исследовании динамических процессов в атмосфере на разных высотах.

### 3. УДАРНЫЕ ВОЛНЫ, РАЗВИВАЮЩИЕСЯ ПРИ РАЗДЕЛЕНИИ СТУПЕНЕЙ

Одно из наиболее характерных эффектных явлений, наблюдающихся при запусках твердотопливных ракет, связан с процессом выключения двигателя при разделении ступеней. Устойчивое горение твердых топлив происходит при достаточно высоком давлении (~10 МПа). Наиболее распространенный способ выключения двигателя состоит в сбросе давления путем открытия дополнительных отверстий в корпусе камеры сгорания [15, 16]. При этом в окружающую среду практически мгновенно выбрасывается большое количество несгоревших частиц топлива и продуктов сгорания. Поскольку давление в камере сгорания на много порядков (более чем в  $10^{10}$  раз) превышает давление окружающего газа, то в верхней атмосфере процесс расширения образовавшегося «облака» с высокой точностью описывается моделью сильного взрыва в разреженной среде [17 – 20].

Масса вещества, выбрасываемого в окружающее пространство при отсечке тяги твердотопливного двигателя, для тяжелых ракет может составлять десятки и даже сотни килограмм и определяется давлением в камере сгорания  $P$ , ее объемом  $V$ , температурой  $T$  и средней молярной массой продуктов горения  $\mu$ :  $M = \mu PV/RT$ . В частности, для вторых ступеней ракет «Минитмен» и «Тополь» значения соответствующих величин  $P \approx 10$  МПа,  $V \approx 2$  м<sup>3</sup>,  $T \approx 2800^\circ\text{K}$ ,  $\mu \approx 0.035$ , и масса выброшенного вещества может составлять 30–40 кг.

В приближении сильного взрыва зависимости радиуса  $r$  и скорости  $v$  движения фронта ударной волны от времени для сферически симметричного случая имеют вид (рис.6).

$$r = (E/\rho)^{1/5} t^{2/5}, \quad v = 2/5(E/\rho)^{1/5} t^{-3/5} \quad (1)$$

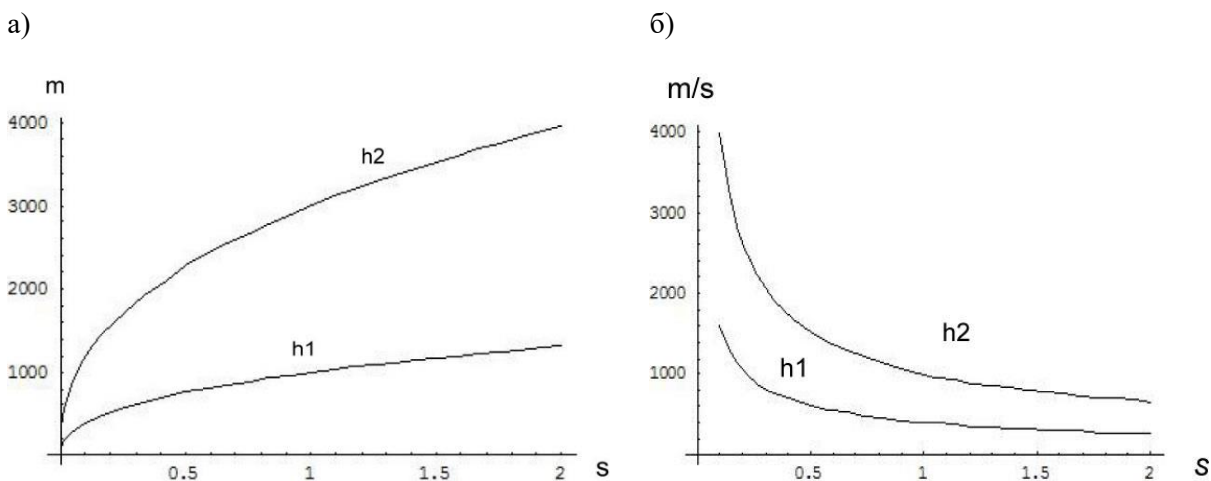


Рис. 6. Радиус (а) и скорость (б) фронта ударной волны для высот  $h_1 = 120$  км и  $h_2 = 150$  км

Выше ~300 км расширение облака происходит как свободномолекулярный разлет из-за возрастания длины свободного пробега [21]. На более низких высотах динамика облака описывается уравнением адиабатического расширения  $PV^\gamma = const$ .



Рис. 7. а) Расширяющаяся сферическая оболочка, образовавшаяся при разделении ступеней твердотопливной ракеты «Посейдон» в Атлантическом океане [28], б) газопылевое облако, образовавшееся при запуске ракеты «Тополь». Диаметр облака превышает 1000 км [24]

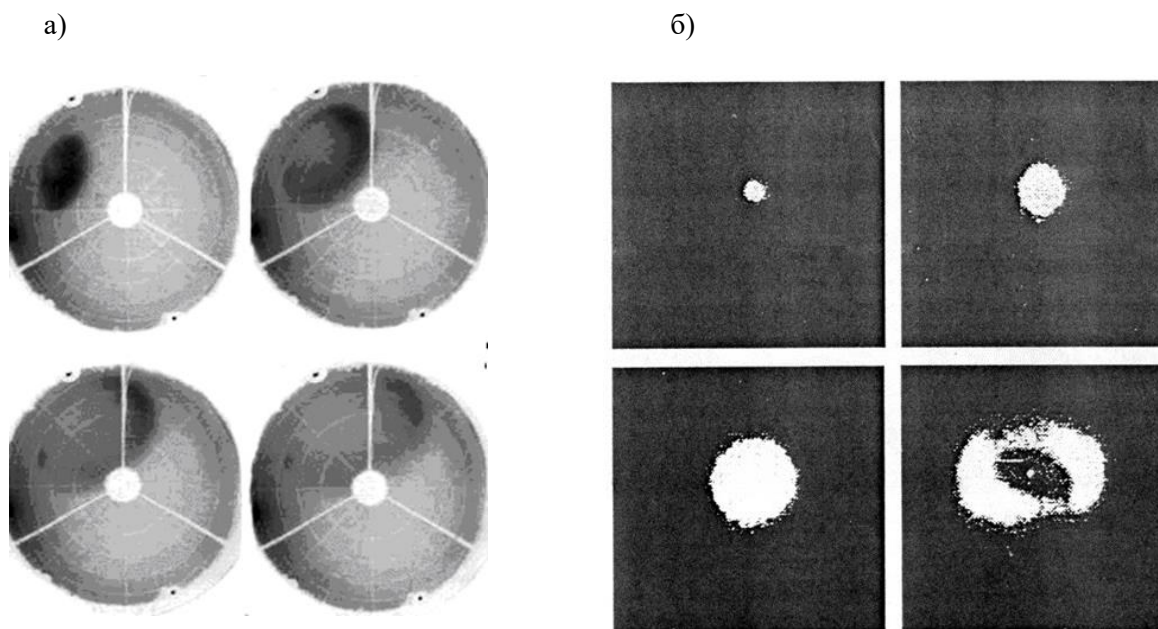


Рис.8. (а) Развитие газопылевого облака, образовавшегося при разделении ступеней твердотопливной ракеты; снимки получены на камерах полного обзора неба в ПГИ РАН, интервал времени между снимками 1 мин. (б) Эволюция облака монометилгидразина, инжектированного на высоте  $\sim 250$  км (б). Снимки соответствуют 1, 5, 20 и 60-ой секунде после инжекции. Каждый кадр соответствует области размером  $\sim 6 \times 6$  км. В процессе расширения облако оседает под действием силы тяжести. В центре последнего снимка виден контейнер, из которого производилась инжекция

Начальная фаза распространения ударной волны сопровождается увлечением дисперсных частиц. Очевидно, что они могут ускориться до наблюдаемых скоростей в поперечном движении ракеты направлении только в начальный момент взрыва, при условии, что энергия ударной волны значительно больше суммарной кинетической энергии частиц. Это условие накладывает ограничение на их общую массу, в частности, при ускорении частиц до скорости  $\sim 3$  км/с их суммарная масса не должна превышать  $\sim 0.2$  всей массы инжектированного вещества. В этом случае почти все дисперсные частицы сконцентрированы в относительно тонком слое. Со временем скорость ударной волны уменьшается, а движение дисперсных частиц происходит практически без торможения [22] и фронт ударной волны в процессе расширения газопылевого облака “отстает” от сферической оболочки. Этот процесс характерен для сильных взрывов в разреженной среде. В зависимости от начальных условий

скорость «оболочки» дисперсных частиц может составлять до 7 км/с [17]. Во время наблюдений реальных явлений зарегистрированные скорости расширения таких сферических облаков составляли от 2 до 5 км/с, при этом размеры расширяющегося облака могут превышать 1000 км. [23, 24].

На рисунке 7 приведены фотографии газопылевых оболочек, образованных при разделении ступеней твердотопливных ракет.

Приближение сильного взрыва не может применяться в случае, когда масса дисперсных частиц, инжигированных при разделении ступеней, сравнима или превышает массу газовой компоненты. В этом случае для моделирования расширения облака дисперсных частиц достаточно рассмотреть довольно простую схему [25]. Скорость расширения оболочки определяется начальными условиями инжигции.

Некоторый аналог таких явлений, развивающихся, как правило, со значительно меньшими скоростями, наблюдался при проведении активных экспериментов с инжигцией дисперсных частиц в верхней атмосфере. На рисунке 8 приведены фотографии, демонстрирующие развитие газопылевого облака, образовавшегося при разделении ступеней твердотопливной ракеты с выбросом большого количества дисперсных частиц, и эволюцию искусственного облака дисперсных частиц после инжигции монометилгидразина на высоте около 250 км в 1991 г. [26].

#### 4. БИРЮЗОВОЕ СВЕЧЕНИЕ В ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЕ

Еще один класс явлений связан не с динамическими особенностями развития газопылевых облаков РДТТ, а с химическим составом топлива и наблюдается в сумеречных условиях в виде образований с интенсивным бирюзовым (сине-зеленым) свечением в области пролета ракеты. На рисунках 9 а и б приведены примеры двух таких образований.

а)



б)



Рис. 9. «Бирюзовое» свечение в атмосфере, зарегистрированное в Норвегии при запуске РН «Булава» в 2009 г. [27]. (а) и наблюдавшееся при запуске РН «Посейдон» в Атлантическом океане [28] (б)

В современных твердых ракетных топливах в качестве одной из основных компонент используется металлический алюминий в виде микро- и нанопорошка. В продуктах сгорания такого топлива, кроме окиси алюминия, в небольших количествах может присутствовать и металлический алюминий [7, 26].

Непосредственно в ПС ракетного топлива моноокись алюминия  $AlO$  не содержится. Однако ее образование может происходить при взаимодействии продуктов сгорания ракетного топлива с компонентами атмосферы:



Константы скоростей этих реакций, по данным [29-32], составляют  $k_1 = 10^{-11} - 4 \cdot 10^{-11} \text{ см}^3\text{с}^{-1}$ ;



$k_2 = 7 \cdot 10^{-11} - 2 \cdot 10^{-10} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$ . Моноокись алюминия может также образовываться в результате присоединения молекул алюминия к его окиси  $\text{Al}_2\text{O}_3$  при высоких температурах (более  $1300^\circ\text{K}$ ).

Свечение  $\text{AlO}$  происходит в результате резонансного рассеяния солнечного излучения  $\text{AlO} + h\nu \rightarrow \text{AlO}^* \rightarrow \text{AlO} + h\nu$  в области длин волн  $4374\text{--}5424 \text{ \AA}$ , которое и определяет “бирюзовый” цвет облака. Длительное “послесвечение” бирюзового облака, т.е. свечение в течение  $\sim$  часа после пролета ракеты, определяется сравнительно небольшим коэффициентом диффузии достаточно тяжелых, относительно окружающего газа, молекул  $\text{AlO}$ .

На рисунке 10 показан спектр свечения облака, оставшегося после пролета твердотопливной ракеты, полученный на спектральной камере С 180\_S для наблюдений полярных сияний в Лопарской (Мурманская обл.).

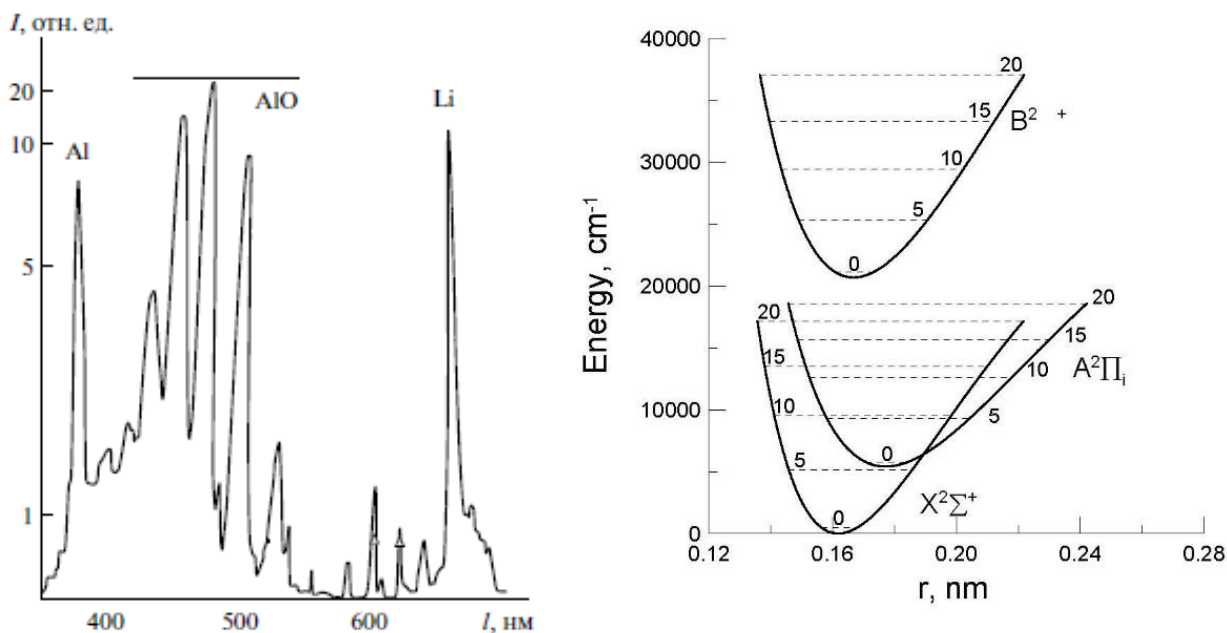


Рис. 10. Спектр газопылевого облака [33] и схема энергетических уровней молекулы  $\text{AlO}$

Свечение  $\text{AlO}$  в верхней атмосфере подробно исследовалось при проведении активных экспериментов с выбросами веществ, содержащих соединения алюминий (см., например, [34, 35]). В частности, в экспериментах с инъекцией триметилалюминия (ТМА) в верхних слоях атмосферы наблюдалось интенсивное свечение  $\text{AlO}$ , образующегося в результате окислительных процессов:  $\text{TMA} + \text{O} \rightarrow \text{AlO} + \text{радикалы}$ .

Неупругие взаимодействия приводят к образованию электронно-возбужденного  $\text{AlO}$ , с эмиссией в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областях спектра. Вполне возможно, что непрерывное излучение ракетных выбросов связано с реакцией:  $\text{AlO} + \text{O} \rightarrow \text{Al} \rightarrow \text{AlO}_2 + h\nu$  (континуум). Кроме того, поскольку моноокись алюминия представляет собой радикал с неспаренным электроном, молекулы  $\text{AlO}$  химически очень активны. Эта активность может привести к эффективным химическим процессам с формированием новых атмосферных компонентов.

Как было указано, основным механизмом возбуждения свечения полос  $\text{B}^2\Sigma \rightarrow \text{X}^2\Sigma$  молекулы  $\text{AlO}$  на высотах выше 100 км в условиях сумерек является резонансная флуоресценция. Солнечное излучение с длиной волны от 450 нм (последовательность  $\Delta v = +2$ ) до 510 нм ( $\Delta v = -1$ )  $\text{AlO}$  поглощается молекулой в основном состоянии  $\text{X}^2\Sigma$ , что приводит к заселению колебательных уровней  $v = 1, 2, 3$  возбужденного состояния  $\text{B}^2\Sigma$ . Окружающая среда выше 100 км настолько разрежена, что, учитывая время жизни компонентов состояния  $\text{B}^2\Sigma$   $\tau \approx 100$  нс, гашение возбужденного состояния при столкновениях с атмосферными компонентами практически отсутствует. Следовательно, будут происходить спонтанные радиационные переходы в основное состояние  $\text{X}^2\Sigma$ .

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Особенности работы твердотопливных ракетных двигателей в верхних слоях атмосферы приводят к образованию крупномасштабных газопылевых облаков со специфической динамикой их развития.

Исследование спектральных характеристик оптических эмиссий газо-пылевых облаков позволяют изучать химические, тепловые и другие физические процессы в атмосфере на больших высотах.

Полученные материалы значительно расширяют и уточняют результаты исследований, представленные в [36].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лазарев А. И., Коваленок В. В., Савиных В. П. Визуальные и инструментальные наблюдения с "Салюта-6". //Л. Гидрометеиздат, 1983. 136 с.
2. Шефов Н. Н., Семенов А. И., Хомич В. Ю. /Излучение верхних слоев атмосферы – показатель ее структуры и динамики. /М. ГЕОС. 2006. 740 с.
3. Ветчинкин Н. В., Границкий Л. В., Платов Ю. В., Шейхет А. И. Оптические явления в околоземной среде при эксплуатации ракетных и спутниковых двигательных установок. I. Наземные и спутниковые наблюдения искусственных образований при пусках ракет. //Космические исследования. Т. 31. №1. С. 93-100. 1993.
4. Platov Yu.V., Chernouss S.A., Kosch M.J. Classification of Gas–Dust Formations from Rocket Exhaust in the Upper Atmosphere. //J. Spacecraft Rocket. V.41. №4. P.667-670. 2004.
5. Беляев А.Н. Внутренние гравитационные волны в средней атмосфере: ч.2. Диффузионные характеристики. //Изв. РАН, Физика атмосферы и океана. Т.32, С.346. 1996.
6. Бронштэн В.А. Метеоры, метеориты, метеороиды. Серия: Планета Земля и Вселенная. /М.: Наука. 1987. 173 с.
7. DeLuca L.T., Maggi F., Dossi S., Fassina M., Paravan C., Sossi A. Prospect of aluminum modification as energetic fuels in chemical rocket propulsion. Chemical Rocket Propulsion. Ed. L.T.DeLuca. /Springer International Publishing P.191–234. 2017 1084 с.
8. Kung R.T.V., Cianciolo L., Myer J.A. Solar Scattering from condensation in Apollo translunar injection plume. //AIAA Journal. V. 13. № 4. P. 432. 1975.
9. Wu B.J.C. Possible water vapor condensation in rocket exhaust plume. //AIAA Journal. V.13. №6. P. 797-802. 1975.
10. Платов Ю. В., Алпатов В. В., Ключников В. Ю. Конденсация водяного пара и углекислого газа в выхлопной струе ракетных двигателей. I. Гетерогенная конденсация продуктов сгорания. //Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 54, №1, с.100-114. 2014.
11. Платов Ю. В., Семенов А. И., Филиппов Б. П. Конденсация водяного пара и углекислого газа в выхлопной струе ракетных двигателей. II. Гетерогенная конденсация продуктов сгорания //Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 54. №1. с.115-120. 2014.
12. Платов Ю.В., Черноус С.А., Алпатов В.В., Особенности оптических явлений, связанных с запусками твердотопливных баллистических ракет. //Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 53. № 1. С. 1–6. 2013.
13. Denison M.R., J.J.Lamb, W.D.Bjorndahl, E.Y.Wong, and P.D. Lohn., Solid rocket exhaust in the stratosphere: Plume diffusion and chemical reactions. J. Spacecr. Rockets. V.31. P. 435-442. 1994.
14. Беляев А.Н. Спектры атмосферных внутренних гравитационных волн. //Изв. АН. Физика атмосферы и океана. Т.28. С.837. 1992.
15. Присняков В. Ф. Динамика ракетных двигателей на твердом топливе. /М.: Машиностроение. 1984. 248 с.
16. Колесников К.С., Козлов В.И., Кукушкин В.В. Динамика разделения ступеней ракеты. /М.: Машиностроение. 1977. 222 с.
17. Баум Ф. М., Станюкович К. П., Шехтер Б. И. Физика взрыва. /М.: Государственное издательство физико-математической литературы. 1959. 800 с.

18. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. /М.: Наука. 1987.430 с.
19. Ивлев Л. С., Романова В. И. Модель газопылевого облака при высотных ракетных вспышках //Оптика атмосферы и океана. Т. 6. № 4. С. 458-468. 1993.
20. Молчанов А.Г., Платов Ю.В. Газодинамическое развитие продуктов сгорания ракетных двигателей в условиях верхней атмосферы. //Геоматизм и Аэронавтика. Т.52. №4. С. 822-827. 2011.
21. Голубь А.П., Козлов С.И., Тасенко С.В. Критерии применимости газодинамического приближения сплошной среды к описанию разлета продуктов сгорания ракетных топлив. //Космические исследования. Т.52. №3. С.197–200. 2014.
22. Платов Ю.В., Ветчинкин Н.В., Черноус С.А. Влияние дисперсной составляющей ракетных выбросов на масштабы возмущений в верхних слоях атмосферы. //Материалы конференции по оптическим методам исследования атмосферы. Киев. с.67. 1996.
23. Tagirov V.R., Arinin V.A., Brändström U. et al. Atmospheric optical phenomena caused by powerful rocket launches. //J. Spacecraft and Rockets. V. 37. 6. P. 812–821. 2000.
24. Nikolayshvili S.Sh., S.I.Kozlov, Yu.V. Platov, A.Yu.Repin, Dynamics of the gas-dust cloud observed in the upper atmosphere on October 26, 2017. //Acta Astronautica V.163. P.133–137. 2019.
25. Беликов Ю. Е., Николайшвили Ш. С., Перадзе Р. К. Модель рассеяния солнечного света на искусственном сферическом газодисперсном облаке в верхних слоях атмосферы Земли. //Космические исследования. Т. 31. №1. С. 135-142. 1993.
26. Simmons F.S. Rocket Exhaust Plume Phenomenology. California: Aerospace Process 2350 El Segundo, 2000. С. 286.
27. Kozlov S.I., S.Sh.Nikolayshvili, Yu.V.Platov, M.V.Silnikov Exceptional optical phenomena observed during operation of Russian launchers. //Acta Astronautica. V.126. P.536-540. 2016.
28. Ballester Olmos V.-J., Perez Ricardo Campo. Identificados! Los OVNIS de Canarias feuron misiles Poseidon. //Revista de Aeronautica y Astronautica. Marzo. P.201–207. 2001.
29. Armstrong E.B. Observation of luminous clouds produced in the upper atmosphere by exploding grenades. I, II, III. //Planet. Space Sci. V.11. P. 733–758. 1963
30. Authier B., Blamont J.E., Carpentier G. NASA Technical Documents. 218. Measurement of the ionosphere temperature beginning with the twilight fluorescence of aluminum oxide. May 6. 05/10. 2010.
31. Zavitsanos P.D., Alyea F.N., Golden J.A. Aluminum vapor release in the upper atmosphere. Accession Number: ADA028820. Final technical rept. Apr 1974–Jan 1976.
32. Houghton J.J. Homogeneous and heterogeneous kinetics of the atomic Al/O<sub>2</sub> reaction in the 1000–1700 K range. //Symp. Int. Combust. Proc. V. 15. P. 775–784. 1975.
33. Chernouss S.A., Kirillov A.S., Platov Yu.V. Optical features of rocket exhaust products interaction with the upper atmosphere. //Proceedings of the 17<sup>th</sup> ESA Symposium on European Rocket and Balloon programs and related research. P. 173-177. 2005.
34. Гусева Н.Н., Ключев О.Ф. Вычисление спектров излучения перехода  $A^2\Sigma^+ \leftrightarrow X^2\Sigma^+$  молекулы AlO для определения температуры верхней атмосферы. //Тр. Института экспериментальной метеорологии. Вып. 6 (74). С. 2–58. 1977.
35. Гершензон Ю.М., Григорьева В.М., Максюттов Ш.Ш. Химия искусственных газовых облаков в верхней атмосфере Земли //Тр. Института экспериментальной метеорологии. Физика верхней атмосферы. Вып. 21. С. 3–31. 1990.
36. Козлов С.И., Николайшвили С.Ш., Платов Ю.В. Оптические явления, наблюдающиеся при запусках и эксплуатации ракетной техники. В «Воздействие ракетно-космической техники на окружающую природную среду». Ред. Адушкин В.В., Козлов С.И., М.В.Сильников. /М.: ЕОС. 2016. С. 794.

**FEATURES OF OPTICAL PHENOMENA ASSOCIATED WITH THE OPERATION OF SOLID-FUEL ROCKETS IN THE UPPER ATMOSPHERE**

Platov Yu.V., Alpatov V.V., Belyaev A.N., Klushnikov V.Yu., Kozlov S.I., Nikolayshvili S.Sh., Omelchenko A.N., Repin A.Yu.

The specific optical phenomena observed in the upper atmosphere associated with the launches of powerful solid-fuel rockets are discussed in the article. There are the spherical symmetry of gas-dust formations that have the form of an expanding "bagel" in the picture plane and formation of region with intense blue-green (turquoise) glow observed in the twilight conditions in the rocket flight region. When the rocket stages are separated, clouds with a spiral structure are observed in the upper atmosphere, which is determined by the rotation of the rocket around the longitudinal axis and the expiration of combustion products through drainage holes in the rocket body. The development of gas-dust clouds that occur during the separation of solid-fuel rocket stages in the upper atmosphere can be described by the model of a strong explosion in a rarefied medium. The turquoise glow observed in the flight area of solid-fuel rockets occurs as a result of the resonant scattering of solar radiation by AlO molecules formed by the interaction of aluminum metal, which is part of the fuel, with atmospheric components and combustion products.

**KEYWORDS:** UPPER ATMOSPHERE LAYERS, SOLID-FUEL ROCKETS, OPTICAL PHENOMENA, GAS-DUST CLOUD, SPHERICAL AND SPIRAL STRUCTURES OF COMBUSTION PRODUCT CLOUDS, TURQUOISE GLOW