

УДК: 533.951

## ОСОБЕННОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ, СВЯЗАННЫХ С ЗАПУСКАМИ ТВЕРДОТОПЛИВНЫХ БАЛЛИСТИЧЕСКИХ РАКЕТ

© 2013 г. Ю. В. Платов<sup>1</sup>, С. А. Черноус<sup>2</sup>, В. В. Алпатов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Троицк (Московская обл.),  
e-mail: yplaton@izmiran.ru*

<sup>2</sup> *Полярный геофизический институт КНЦ РАН, г. Апатиты (Мурманская обл.)  
e-mail: chernouss@pgia.ru,*

<sup>3</sup> *Институт прикладной геофизики им. Е.К.Федорова, Росгидромета, г. Москва  
e-mail: v\_alpatov@mail.ru*

Поступила в редакцию 23.03.2011 г.

После доработки 11.05.2012 г.

В работе рассматриваются специфические оптические явления, наблюдающиеся в верхних слоях атмосферы и связанные с запусками мощных твердотопливных ракет: развитие сферически симметричных газо-пылевых образований, имеющих в картинной плоскости вид расширяющегося “бублика”; формирование в области пролета ракеты областей с интенсивным сине-зеленым (бирюзовым) свечением, наблюдающимся в сумеречных условиях. Развитие облаков может быть представлено моделью сильного взрыва, возникающего при разделении ступеней твердотопливных ракет в условиях верхней атмосферы. Бирюзовое свечение возникает в результате резонансного рассеяния солнечного излучения на молекулах  $\text{AlO}$ , образующихся при взаимодействии металлического алюминия, входящего в состав топлива с компонентами атмосферы и продуктами сгорания.

DOI: 10.7868/S001679401301015X

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Запуски мощных ракет и работа двигательных установок космических аппаратов сопровождаются выбросами в околоземную среду продуктов сгорания сложного состава, содержащих как газовую компоненту, так и дисперсные образования, что приводит к развитию газо-пылевых облаков, обладающих определенными геометрическими и динамическими особенностями. Развитие искусственных образований в верхней атмосфере сопровождается достаточно необычными оптическими явлениями, в основном, обусловленными рассеянием солнечного света на продуктах сгорания и их взаимодействием с компонентами верхней атмосферы [Kung et al., 1975; Ветчинкин и др., 1993; Tagirov et al., 2000; Platov et al., 2004].

В настоящее время накоплен достаточно большой массив данных о развитии оптических явлений, связанных с запусками ракет, что позволило провести предварительную классификацию наблюдаемых эффектов [Platov et al., 2004].

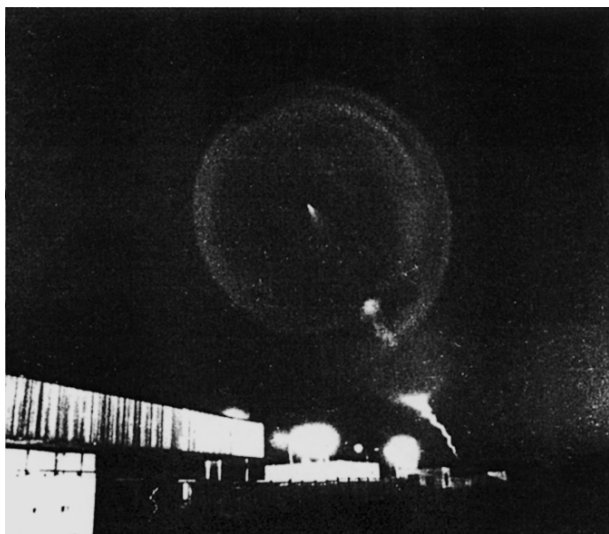
Оптические эффекты в верхней атмосфере, сопровождающие запуски жидкостных и твердотопливных ракет во многом подобны, поскольку и те, и другие связаны с выбросом продуктов сгорания и их взаимодействием с компонентами атмосферы. Однако имеется определенный тип явлений, присущих исключительно запускам твердотопливных

ракет, что определяется особенностями работы твердотопливных двигателей и составом компонентов топлива.

Цель работы состоит в интерпретации двух классов оптических явлений, сопровождающих запуски мощных твердотопливных ракет: развитие в верхней атмосфере после разделения ступеней ракет сферических крупномасштабных газо-пылевых образований, имеющих в картинной плоскости вид “бубликов” и интенсивного бирюзового (сине-зеленого) свечения, наблюдающегося в области пролета ракеты.

### 2. РАЗВИТИЕ СФЕРИЧЕСКИХ ГАЗО-ПЫЛЕВЫХ ОБЛАКОВ

В работах [Платов и др., 2003; Platov et al., 2004] отмечалось, что процесс выключения твердотопливных ракетных двигателей (РДТТ) после вывода ракеты на расчетную траекторию часто сопровождается развитием крупномасштабных динамических образований, имеющих в картинной плоскости форму, напоминающую “бублик”. Этот процесс связан с резким сбросом давления в камере сгорания при отсечке тяги двигателя, что приводит к практически мгновенному выбросу в атмосферу большого количества различных компонент топлива и продуктов сгорания. Количество инъекти-



**Рис. 1.** Редкий снимок “бублика”, развившегося после разделения ступеней твердотопливной ракеты. В центре “бублика” видно изображение факела двигателя последней ступени ракеты. Судя по характерным деталям, диаметр облака составляет >200 км. Вся область развития явления, включая место запуска, освещена Солнцем.

рованного вещества при этом для мощных ракет может составлять сотни килограмм, причем значительная доля выброса находится в дисперсном состоянии из-за специфического состава топлива и неполного сгорания компонент топлива. Масса вещества, выбрасываемого в атмосферу при сбросе давления в ракете с твердотопливным двигателем определяется давлением в камере сгорания —  $P$ , ее объемом —  $V$ , температурой —  $T$  и средней молярной массой продуктов горения —  $\mu$ :  $M = \mu PV/RT$ . Для характерных значений  $P \approx 10$  МПа,  $V \approx 20$  м<sup>3</sup>,  $T \approx 2800$  К,  $\mu \approx 0.035$  [Экологические..., 2000] масса выброшенного вещества может составлять 300–400 кг. Скорость расширения таких “облаков” составляет  $\sim 2$  км/с, а их поперечный размер в горизонтальной плоскости может достигать  $\sim 1000$  км [Platov et al., 2004]. В отдельных случаях фрагменты таких образований могут подниматься до высот  $\sim 700$  км [Tagirov et al., 2000], что свидетельствует об их начальной вертикальной скорости  $\sim 4$  км/с, которая является векторной суммой вертикальной скорости ракеты в момент образования облака (6–7 км/с) и скорости самого облака относительно ракеты. Время развития таких явлений определяется в основном временем подъема и оседания выброшенного вещества под действие силы тяжести до  $\sim 100$  км, т.е. до границы турбопаузы.

Моделью развития таких явлений может служить приближение сильного взрыва в газовой среде. Такое приближение успешно применялось, в частности, для моделирования газодина-

мического разлета продуктов сгорания ракетных двигателей в условиях верхней атмосферы [Ивлев и Романова, 1993; Молчанов и Платов, 2011]. Поскольку давление в камере сгорания ракеты ( $\sim 10$  МПа) намного превышает давление окружающего газа ( $\sim 5 \times 10^{-4}$  Па), условие применимости автомодельного решения заведомо выполняются. В этом приближении зависимость радиуса  $r$  и скорости  $v$  движения ударной волны от времени для сферически симметричного случая имеют вид [Седов, 1987]

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

где  $E$  — энергия, выделяющаяся при взрыве, а  $\rho$  — начальная плотность газа. Полагая, что  $E \sim 2 \times 10^8$  Дж (для  $P \approx 10$  МПа,  $V \approx 20$  м<sup>3</sup>), а  $\rho \sim 10^{-10}$  кг/м<sup>3</sup>, нетрудно найти, что характерная скорость ударной волны составляет  $\sim 2 \times 10^3 t^{-3/5}$  м/с. Полученная величина хорошо согласуется с результатами измерения скоростей разлета облаков дисперсных частиц, образующихся при разделении ступеней твердотопливных ракет [Платов и др., 2003].

Процесс распространения ударной волны может быть связан с увлечением частиц конденсированной фазы. Очевидно, что твердые частицы, если их количество не слишком велико (энергия ударной волны должна быть значительно больше кинетической энергии дисперсных частиц), могут ускориться до скоростей  $\sim 2 \times 10^3$  м/с в поперечном движению ракеты направлении только в первые секунды разлета. В этом случае почти все вещество сконцентрировано в относительно узком слое позади фронта ударной волны. На рисунке 1 показан вид такой сферической “оболочки” (“бублика” в картинной плоскости), образовавшейся при разделении ступеней твердотопливной ракеты. Свечение достаточно тонкого расширяющегося сферического слоя кроме рассеяния солнечного света на дисперсной компоненте может вызываться также скачком температуры на фронте ударной волны. Зависимость температуры от параметров, определяющих условия в ударной волне имеет вид [Седов, 1987]

$$T = \frac{2(\gamma - 1)}{R(\gamma + 1)^2} c^2 = \frac{2(\gamma - 1)}{R(\gamma + 1)^2} \frac{4E}{25\rho r^3},$$

здесь  $R$  — универсальная газовая постоянная,  $r$  — “радиус” ударной волны,  $\gamma$  — показатель адиабаты (для воздуха  $\gamma \approx 1.4$ ). Нетрудно оценить, что на расстояниях в несколько десятков километров от центра взрыва температура на фронте ударной волны превышает  $\sim 1000$  К, что вполне достаточно для возбуждения свечения в оптическом диапазоне. На больших расстояниях, составляющих сотни километров, этот механизм свечения, од-

нако, неэффективен, так как температура достаточно быстро падает с расстоянием.

Интересно отметить, что на снимке нет заметной зависимости интенсивности свечения такого облака от высоты, т.е. от угла рассеяния солнечного излучения. Это обстоятельство накладывает некоторые ограничения на размер дисперсных частиц. На рисунке 2 приведены индикатрисы рассеяния, рассчитанные в приближении Ми для сферических частиц различных размеров. В предположении, что при изменении углов рассеяния от 0 до 15 градусов интенсивность рассеянного света должна меняться не более чем в два раза (незначительное изменение фотографической плотности) нетрудно оценить, что диаметр рассеивающих частиц не должен превышать 2–3 мкм (или количество крупных частиц должно быть относительно невелико). Такая оценка достаточно условна, поскольку получена в предположении, что рассеивающие частицы представляют собой ледяные шарики правильной формы, что конечно весьма условно, но для качественного описания эффекта вполне приемлемо.

Приближение сильного взрыва неприменимо в случае, когда масса дисперсных частиц, инжектированных в атмосферу при разделении ступеней, сравнима по величине или превышает массу газовой компоненты. В этом случае для моделирования расширения облака дисперсных частиц достаточно рассмотреть довольно простую схему. Такое “облако” можно представить в виде расширяющейся сферической размытой оболочки. Скорость расширения оболочки  $v_d$  определяется начальными условиями инжекции. Сферическая оболочка размывается в результате процессов вязкости. Плотность частиц зависит от расстояния от центра сферы как

$$n = n_0 \exp\left(-\frac{D - D_0}{a}\right)^2.$$

Здесь  $D_0$  – текущий диаметр сферы (на уровне максимальной плотности),  $a$  – характерный масштаб “размытости” сферической поверхности. Амплитудное значение плотности  $n_0$  одинаково по всей поверхности и определяется из условия нормировки

$$N = \frac{M}{m} \int_0^\infty 4\pi R^2 n_0 \exp\left(-\frac{D - D_0}{a}\right)^2 dD,$$

где  $N$  – общее количество дисперсных частиц в выбросе,  $M$  – общее количество выброшенного вещества, а  $m$  – масса одной дисперсной частицы.

Некоторый аналог таких явлений, развивающихся, как правило, со значительно меньшими скоростями, наблюдается при проведении активных экспериментов с инжекцией дисперсных частиц в верхней атмосфере. На рисунке 3 при-

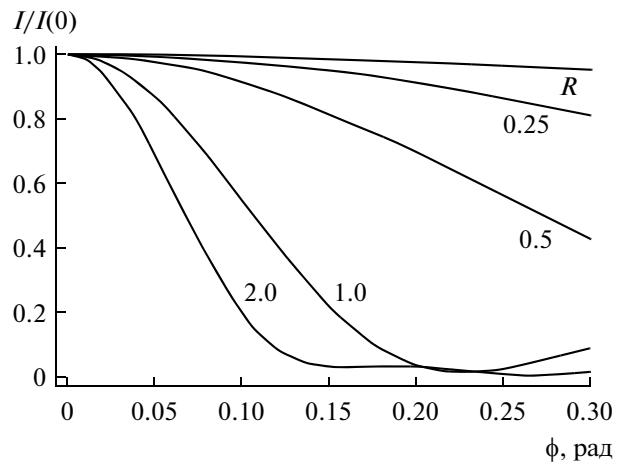


Рис. 2. Индикатрисы рассеяния света на сферических ледяных частицах разного размера:  $R$  – релеевское рассеяние и рассеяние Ми на частицах радиуса 0.25, 0.5, 1 и 2 мкм. По оси абсцисс угол рассеяния в радианах, по оси ординат относительная интенсивность рассеянного излучения.

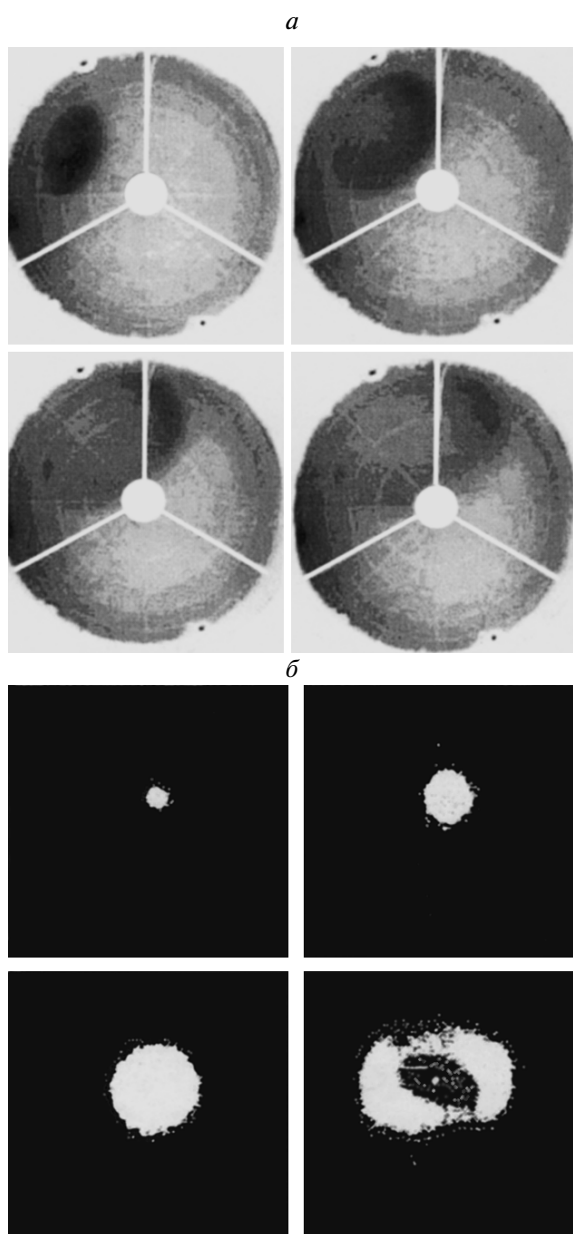
ведены фотографии, демонстрирующие развитие газо-пылевого облака, образовавшегося при разделении ступеней твердотопливной ракеты с выбросом большого количества дисперсных частиц, и эволюцию искусственного облака дисперсных частиц после инжекции монометил гидразина на высоте около 250 км в 1991 г. [Simmons, 2000] (Shuttle, STS 39).

Фотометрические характеристики газо-пылевых облаков определяются такими параметрами, как количество рассеивающего вещества, размером частиц, их плотностью, геометрическими факторами рассеяния и пр. Расчеты светимости таких облаков для различных условий освещенности приведены, например, в работе [Беликов и др. 1993].

### 3. “БИРЮЗОВОЕ” СВЕЧЕНИЕ

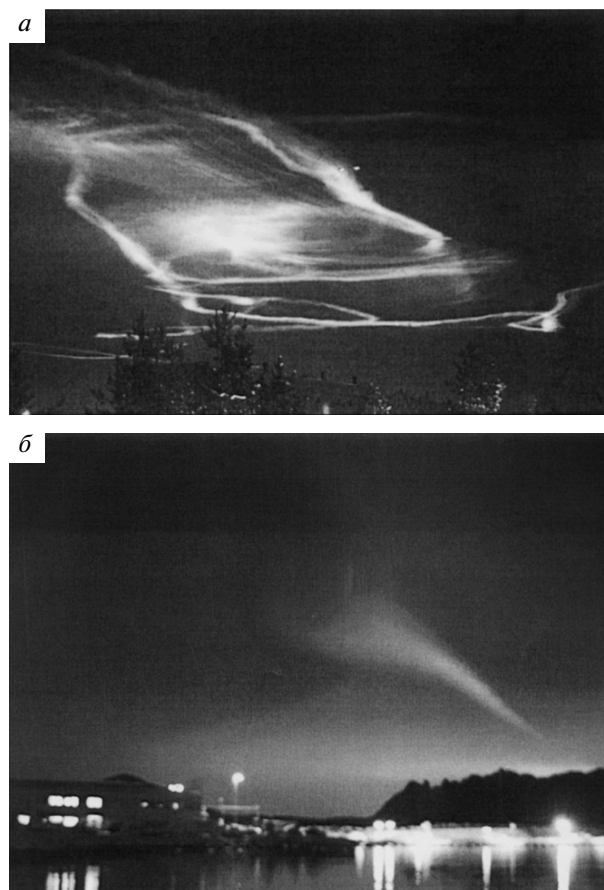
Второй класс явлений связан не с динамическими особенностями развития газо-пылевых облаков РДТТ, а с химическим составом топлива и проявляется в наблюдении в сумеречных условиях образований с интенсивным бирюзовым (сине-зеленым) свечением в области пролета ракеты. На рисунке 4 приведены два снимка таких образований.

Во время запуска ракеты “Булава” из акватории Белого моря область пролета ракеты выше ~30 км была освещена солнечным светом восходящего Солнца, в то время как наблюдатели находились на ночной стороне Земли и, естественно, наблюдать его могли очевидцы, проживающие в регионах, расположенных западнее места старта. На территории России (Мурманская область, Ка-



**Рис. 3.** Развитие газо-пылевого облака, образовавшегося при разделении ступеней твердотопливной ракеты (а); снимки получены на камерах полного обзора неба в ПГИ РАН, интервал времени между снимками — 1 мин. Эволюция облака монометил гидразина, инжектированного на высоте ~250 км (б). Последовательность снимков соответствует 1, 5, 20 и 60-й секунде после инъекции. Каждый кадр соответствует области развития эффекта атмосферы размером ~6 × 6 км. В процессе расширения облако оседает под действием силы тяжести. В центре последнего снимка видно изображение контейнера, из которого производилась инъекция.

релия) наблюдать этот эффект было невозможно, поскольку в момент старта (~9:45 МСК) угол погружения Солнца под горизонт был невелик ~6°, что соответствует высоте земной тени ~30 км, и



**Рис. 4.** Размытый след с бирюзовым свечением, оставшийся в стратосфере после пролета твердотопливной ракеты, полученный в г. Апатиты (а). Бирюзовое облако вдоль траектории полеты ракеты “Булава” вплоть до отделения второй ступени, наблюдавшееся 9 декабря 2009 г. в Норвегии (б). К сожалению, черно-белый вариант снимков не может передать всей красочности наблюдавшихся явлений.

на фоне уже достаточно яркого неба картина запуска была незаметна. Подробный анализ эффектов, наблюдавшихся при запуске этой ракеты, приведен в работе [Platov and Chernouss, 2011].

В твердых топливах ракетных двигателей, в качестве присадок к топливу, повышающих устойчивость горения в небольших количествах добавляются Al, Li и другие компоненты [Присняков, 1984; Simmons, 2000]. В процессе их окисления различными компонентами продуктов сгорания и атмосферы, такими как  $N_2O$ ,  $O_2$ ,  $O_3$ ,  $CO_2$ ,  $NO_2$ ,  $NO$  и др. может образоваться закись алюминия  $AlO$ , которая в продуктах сгорания непосредственно не содержится. Закись алюминия может образовываться также в результате присоединения молекул алюминия к его окиси  $Al_2O_3$  при высоких температурах (более 1300 К). В условиях освещенности искусственных образований солнечным светом механизм возбуждения эмиссий

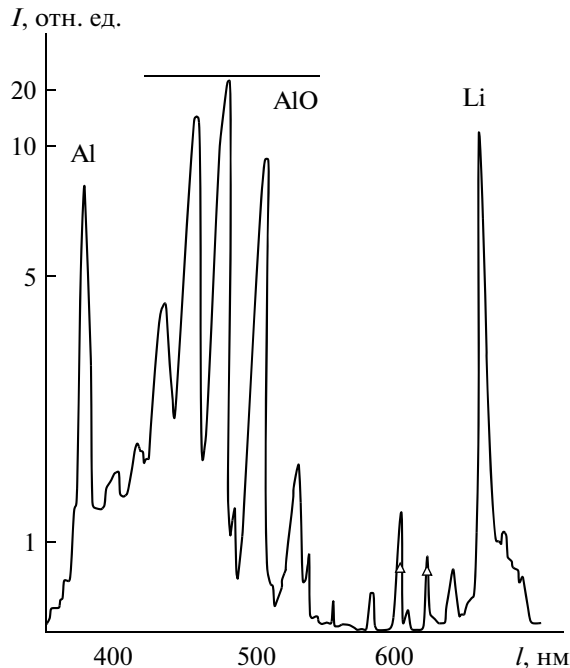


Рис. 5. Спектр «бирюзового» облака. Интенсивность свечения приведена в относительных единицах, поскольку абсолютной калибровки не проводилось.

AlO заключается в резонансном рассеянии солнечного излучения:  $\text{AlO} + h\nu \rightarrow \text{AlO}^* \rightarrow \text{AlO} + h\nu$  в области длин волн 4374 Å–5424 Å, которое и определяет «бирюзовый» цвет газо-пылевого следа ракеты. Длительное «послесвечение» бирюзового облака, т.е. свечение в течение ~ часа после пролета ракеты, определяется сравнительно небольшим коэффициентом диффузии достаточно тяжелых, относительно окружающего газа, молекул AlO.

На рисунке 5 показан спектр свечения облака, оставшегося после пролета твердотопливной ракеты, полученный на спектральной камере С-180\_S для наблюдений полярных сияний в Лопарской (Мурманская обл.).

Свечение AlO в верхней атмосфере подробно исследовалось при проведении активных экспериментов с выбросами алюминий содержащих компонент (см., например [Гусева и Клюев, 1977; Narang, 1967; Гершензон и др., 1990]). В частности, в экспериментах с инъекцией триметила алюминия (ТМА) в верхних слоях атмосферы наблюдалось интенсивное свечение AlO, образующегося в результате окислительных процессов:  $\text{TMA} + \text{O} \rightarrow \text{AlO} + \text{радикалы}$  [Dagdikian et al., 1975].

Неупругие взаимодействия приводят к образованию электронно возбужденного AlO, с эмиссией в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областях спектра.

Вполне возможно, что непрерывное излучение ракетных выбросов связано с реакцией:  $\text{AlO} + \text{O} \rightarrow \text{AlO}_2^* \rightarrow \text{AlO}_2 + h\nu$  (континуум). Кроме того, поскольку закись алюминия представляет собой радикал с неспаренным электроном, молекулы AlO химически очень активны. Эта активность может привести к эффективным химическим процессам с формированием новых атмосферных компонентов.

Таким образом, наличие в продуктах сгорания твердых ракетных топлив металлического алюминия и его взаимодействие с компонентами атмосферы и другими продуктами сгорания топлива приводит к образованию AlO и наблюдению сине-зеленого излучения во время запусков твердотопливных ракет в сумеречное время.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальные результаты показывают, что особенности работы твердотопливных ракетных двигателей в верхних слоях атмосферы приводят к образованию газо-пылевых облаков со специфическими динамическими особенностями развития и спектральными характеристиками их оптических эмиссий. Исследование эмиссий AlO и Li в оптическом диапазоне позволяют изучать химические, тепловые и другие физические процессы в атмосфере на больших высотах.

Работа выполнена при поддержке РФФИ: проект № 10-05-00792-а и проект № 10-05-988000-р-север-а.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Беликов Ю.Е., Николайшвили Ш.С., Перадзе Р.К. Модель рассеяния солнечного света на искусственном сферическом газодисперсном облаке в верхней атмосфере Земли. // Космич. исслед. Т. 31. № 1. С. 135–142. 1993.
- Ветчинкин Н.В., Границкий Л.В., Платов Ю.В., Шейхет А.И. Оптические явления в околоземной среде при работе двигательных установок ракет и спутников. I. Наземные и спутниковые наблюдения искусственных образований при запусках ракет // Космич. исслед. Т. 31. № 1. С. 93–100. 1993.
- Гершензон Ю.М., Григорьева В.М., Максютов Ш.Ш. Химия искусственных газовых облаков в верхней атмосфере Земли // Тр. ин-та эксперим. метеорологии. Вып. 21 (143). С. 3–31. 1990.
- Гусева Н.Н., Клюев О.Ф. Вычисление спектров излучения перехода  $A^2\Sigma^+ \leftrightarrow X^2\Sigma^+$  молекулы AlO для определения температуры верхней атмосферы // Тр. ин-та эксперим. метеорологии. Вып. 6 (74). С. 52–58. 1977.
- Ивлев Л.С., Романова В.И. Модель газопылевого облака в высотных ракетных факелах // Оптика атмосферы и океана. Т. 6. № 4. С. 458–468. 1993.

- Молчанов А.Г., Платов Ю.В. Газодинамическое развитие продуктов сгорания ракетных двигателей в условиях верхней атмосферы // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. № . С. 2011.
- Платов Ю.В., Куликова Г.Н., Черноус С.А. Классификация газопылевых образований в верхней атмосфере, связанных с выбросами продуктов сгорания ракетных двигателей // Космич. исслед. Т. 41. № 2. С. 168–173. 2003.
- Присяжков В.Ф. Динамика ракетных двигателей твердого топлива. М.: Машиностроение. 248 с. 1984.
- Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 430 с. 1987.
- Экологические проблемы и риски воздействия ракетно-космической техники на окружающую природную среду. Ред. Адушкин В.В., Козлов С.И. и Петров А.В. М.: “Анкил”. 639 с. 2000.
- Dagdigan P.J., Cruse H.W., Zare R.N. Laser fluorescence study of AlO formed in the reaction Al + O<sub>2</sub>: Product state distribution, dissociation energy, and radiative lifetime // J. Chem. Phys. V. 62. P. 1824–1833. 1975.
- Harang O.E. On the use of resonant spectra of AlO in deduction of the upper atmosphere temperatures // Phys. Norvegica. V. 2. № 1. P. 71–84. 1967.
- Kung R.T.V., Cianciolo L., Myer J.A. Solar scattering from condensation in Apollo translunar injection plume // AIAA Journal. V. 13. № 4. P. 432–437. 1975.
- Platov Yu.V., Chernouss S.A., Kosch, M. J. Classification of gas-dust formations from rocket exhaust in the upper atmosphere by scale and dynamics // J. Spacecraft Rockets. V. 41. № 5. P. 667–670. 2004.
- Platov Yu.V., Chernouss S.A. Optical phenomena associated with the launch of a ballistic missile “Bulava” December 9, 2009. Proc. 33<sup>rd</sup> Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”. ISBN 978-5-91137-136-4. C. 186–190. 2011.
- Simmons F.S. Rocket exhaust plume phenomenology. California: Aerospace Press 2350 El Segundo. 286 p. 2000.
- Tagirov V.R., Arinin V.A., Brändström U., Pajunpää A., Klímenko V.V. Atmospheric optical phenomena caused by powerful rocket launches // J. Spacecraft Rockets. V. 37. № 6. P. 812–821. 2000.