

УДК 504.054.629

## ЭВОЛЮЦИЯ ГАЗОПЫЛЕВОГО ОБЛАКА В ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЕ: АНАЛИЗ СОБЫТИЯ 26 ОКТЯБРЯ 2017 г.

© 2019 г. С. Ш. Николайшвили<sup>1</sup>, \*, С. И. Козлов<sup>2</sup>, Ю. В. Платов<sup>3</sup>, \*\*, А. Ю. Репин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладной геофизики им. Е.К. Федорова Росгидромета, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт динамики геосфер РАН (ИДГ РАН), г. Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия

\*e-mail: ser58ge@mail.ru

\*\*e-mail: yplaton@mail.ru

Поступила в редакцию 13.12.2018 г.

После доработки 28.12.2018 г.

Принята к публикации 24.01.2019 г.

Проанализирована последовательность цифровых изображений газопылевого облака продуктов сгорания твердого топлива, образовавшегося при разделении ступеней ракеты. Изображения получены в сумеречных условиях с расстояния ~1500 км. Высота центра облака достигает ~900 км, а его диаметр ~2000 км. Полученные данные позволяют оценить дисперсный состав облака и динамические параметры его развития. Практически постоянная скорость расширения облака ~2 км/с свидетельствует о том, что оно состоит из достаточно крупных дисперсных частиц, не тормозящихся в верхней атмосфере. Предложенная методика может быть использована для уточнения физической картины взаимодействия продуктов сгорания твердого топлива с окружающей средой.

DOI: 10.1134/S0016794019040126

### 1. ВВЕДЕНИЕ

По сообщениям СМИ, в частности, телеканала Россия 24, со ссылкой на Министерство обороны России, 26 октября 2017 г. “в процессе тренировки по управлению стратегическими ядерными силами России были проведены пуски межконтинентальных баллистических ракет (МБР) с космодрома Плесецк, из акватории Баренцева

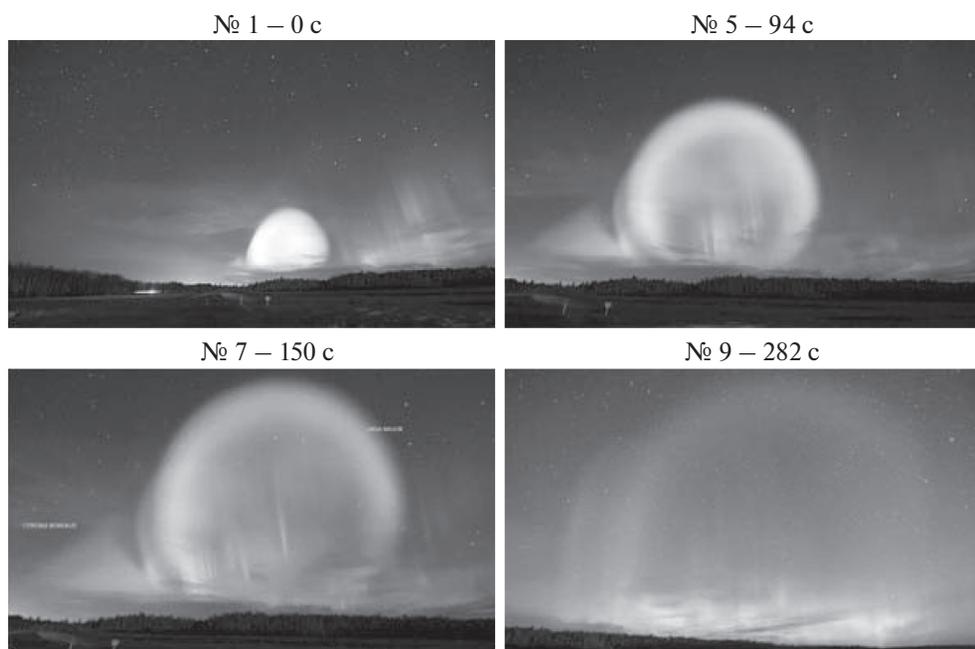
моря и с полигона “Чижа” на полигон “Кура” [S1, 2017] (рис. 1).

Пуск ракеты с космодрома Плесецк был осуществлен после захода Солнца, но значительный участок траектории полета ракеты находился выше земной тени в области, освещенной Солнцем.

Геофизическая активность в этот период была на достаточно высоком уровне, поэтому в север-



Рис. 1. Траектории полета МБР по данным сайта [S1, 2017].



**Рис. 2.** Развитие оптического явления на фоне полярных сияний – номера кадров и время в с после первого кадра  $t_0$  (по материалам сайта [S2, 2017]).

ных районах от Кольского п-ова до Восточной Сибири проводились наблюдения полярных сияний. При этом в ряде случаев были получены фотографии необычного оптического явления – светящейся сферы, которая перемещалась с запада на восток и постепенно увеличивалась в размерах. Наиболее полная картина развития этого явления была представлена на сайте [S2, 2017].

Картина развития облака (см. рис. 2) соответствует явлениям, рассмотренным в публикациях [Алпатов и др., 2016; Kozlov et al., 2016], сопровождавшим запуски твердотопливных ракет. Свечение облаков вызвано рассеянием солнечного света на дисперсных частицах компонентов топлива и продуктов сгорания, выброшенных в атмосферу при отсечке тяги двигателя ракеты. На всех снимках наблюдается “бирюзовое” свечение монооксида алюминия  $AlO$ , образующейся в результате взаимодействия металлического алюминия, содержащегося в топливе и продуктах сгорания, с кислородом атмосферы [Николайшвили и др., 2015; Платов и Николайшвили, 2018].

Аналогичные явления неоднократно наблюдались в различных регионах Земли при запусках твердотопливных баллистических ракет. В частности, в 80-х годах прошлого столетия на станциях наблюдения полярных сияний в северных районах России были зарегистрированы крупномасштабные сферические быстро расширяющиеся облака на удаленностях свыше тысячи километров от предполагаемого места старта ракет. Размеры облаков в ряде случаев превышали 1500 км в диа-

метре, а скорости их расширения варьировались от 3 до 7 км  $c^{-1}$  [Tagirov et al., 2000].

## 2. ДИНАМИКА ГАЗОПЫЛЕВОГО ОБЛАКА

На рисунке 3 приведена схема наблюдений облака из северной части Томской обл. (г. Стрежевой) с указанием положения центра облака для разных кадров.

Наличие изображений звезд на фотографиях (созвездия Большой Медведицы, Волопаса, Северная Корона) позволило определить угловые координаты наблюдавшегося облака, а также оценить его размеры и динамические характеристики. Измерения проводились путем определения углового положения центра облака относительно звезд с последующим вычислением линейных размеров. Результаты, представленные на рис. 4, показывают, что горизонтальная скорость перемещения центра облака вдоль траектории полета ракеты составляет  $\sim 3.1$  км  $c^{-1}$ . Скорость расширения облака (увеличение радиуса)  $\sim 2.2$  км  $c^{-1}$ . Скорость расширения облака и скорость перемещения его центра вдоль траектории полета ракеты практически не меняются в течение времени съемки, что свидетельствует об отсутствии торможения вещества облака в верхних слоях атмосферы [Chernouss et al., 1998].

На рисунке 5 приведен фотометрический разрез наблюдавшегося облака по оси АВ, имеющий характерный “двугорбый” вид. В работе [Николайшвили и др., 2015] была рассмотрена модель

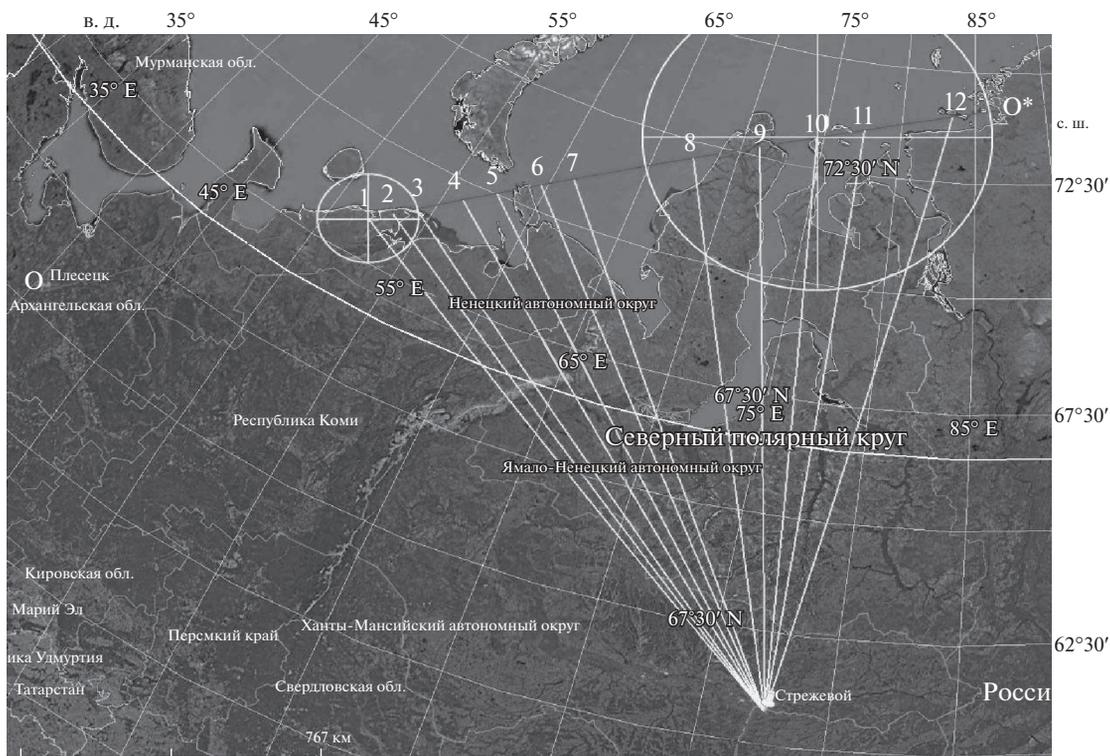


Рис. 3. Траектория ракеты (линия O—O\*) и направления на центр облака для разных снимков. Окружности — приближительные размеры облака для кадров 1 и 9.

облака, образованного при разделении ступеней твердотопливной ракеты, в виде размытой сферической оболочки и было показано, что для оптически тонкого облака распределение яркости по диаметру изображения облака должно быть именно таким. Отметим, что максимальная яркость изображения не превышает предельного для изображений формата JPEG уровня 255, т.е. яркость облака не выходила за пределы динамического диапазона светочувствительного элемента. Вместе с тем различные точки изображения облака имеют различную яркость. Таким образом можно сделать вывод, что к моменту, когда был сделан кадр, облако уже не являлось оптически плотным.

### 3. ФОТОМЕТРИЯ ГАЗОПЫЛЕВОГО ОБЛАКА

Наличие на снимках большого количества звезд различной яркости и спектральных классов дает возможность достаточно корректно оценить интегральную светимость облака [Platov, 2000]. Поскольку свечение облака обусловлено рассеянием солнечного света, процесс калибровки заключается в определении светимости облака в единицах светимости какой-либо реперной звезды, светимость которой может быть выражена в долях светимости Солнца.

В качестве реперной была выбрана звезда Неккар созвездия Волопас ( $\beta$  Boo), звездная величина  $m = 3.45$ , спектральный класс G8. Звездная вели-

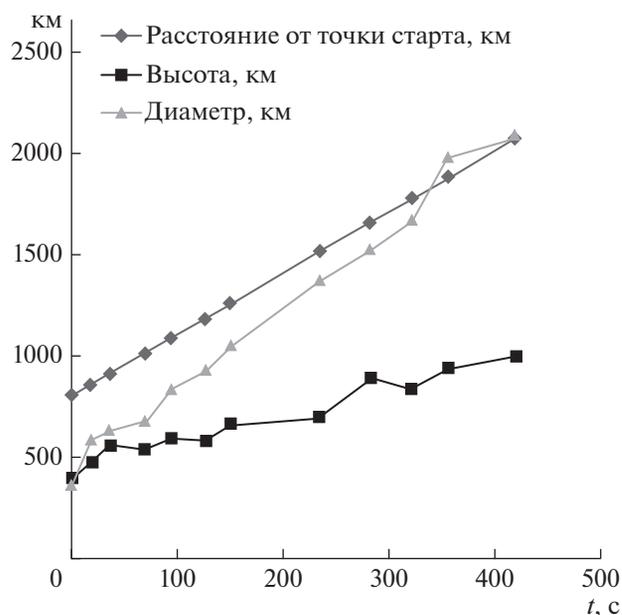
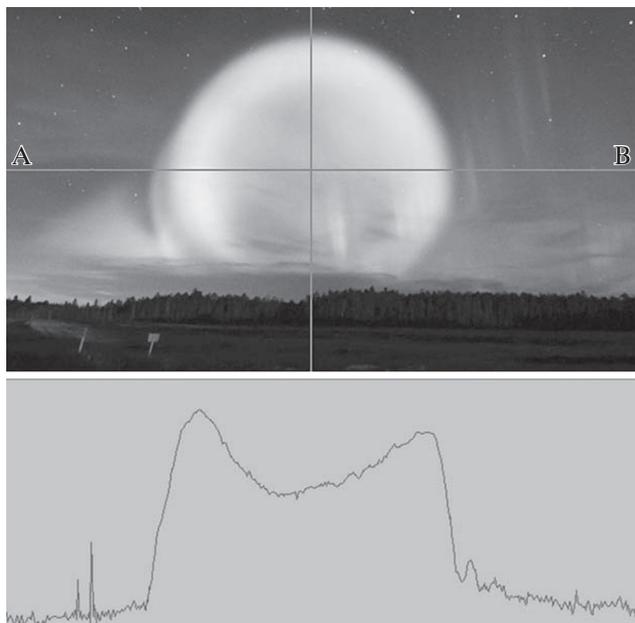
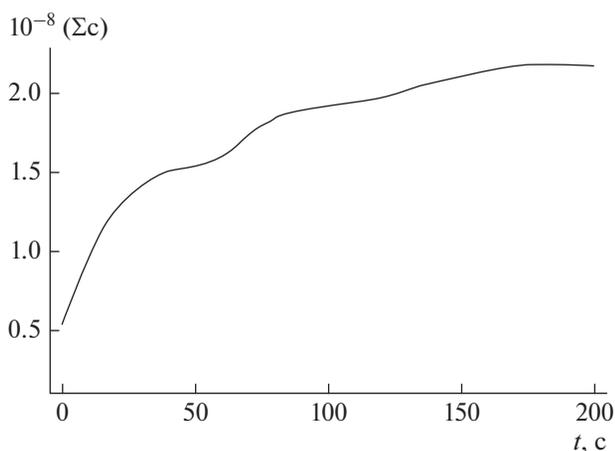


Рис. 4. Расстояние от места старта до центра облака, изменение диаметра облака и высоты центра облака над поверхностью Земли. Отсчет времени производится от времени съемки первого кадра.



**Рис. 5.** Фотометрический разрез изображения облака по оси АВ (кадр № 4,  $t_0 + 70$  с). Профиль разреза соответствует модели облака в виде размытой сферической оболочки.



**Рис. 6.** Светимость облака в единицах светимости Солнца. (Отсчет времени производится от времени первого кадра).

чина Солнца  $S_m = -26.7$ , спектральный класс  $G2$ . Выбор определялся тем, что спектральный класс данной звезды достаточно близок к спектральному классу Солнца.

Светимость реперной звезды в долях светимости Солнца:

$$\Sigma_{3-c} = \{2.51^{(26.7 + 3.45)}\}^{-1} = 0.89 \times 10^{-12}.$$

На рисунке 6 приведена зависимость от времени интегральной светимости облака, выраженной в единицах светимости Солнца —  $\Sigma_c$ . Быст-

рый рост этой величины до  $\sim 80$  с с последующим замедлением свидетельствует о том, что в начальный период облако не было оптически прозрачным. Такой эффект наблюдался и ранее при запусках жидкостных ракет [Ветчинкин и др., 1993].

При рэлеевском рассеянии зависимость интенсивности рассеянного света от параметров рассеивающего облака определяется выражением

$$I = I_0 k \frac{Mv}{r^2 \lambda^4 \rho} (1 + \cos^2 \theta),$$

где  $I_0$  — интенсивность падающего излучения;  $k$  — константа, зависящая от свойств рассеивающего вещества (для воды/льда  $k \sim 10$ );  $M$  — общая масса рассеивающего вещества;  $v$  — объем рассеивающей частицы;  $r$  — расстояние до наблюдателя;  $\lambda$  — длина волны;  $\rho$  — плотность вещества частиц;  $\theta$  — угол рассеяния.

Массу вещества, выбрасываемого при отсечке тяги твердотопливного двигателя, можно приближенно оценить, как  $M = PV\mu/RT$  ( $P$  — давление в камере сгорания  $\sim 10^7$  Па;  $V$  — объем камеры сгорания  $\sim 2-5$  м<sup>3</sup>;  $\mu$  — молярная масса продуктов горения  $\sim 0.035$ ;  $M \sim 50-100$  кг) [Платов и др., 2013].

Для частиц с характерным размером  $l$  ( $r \sim 1000$  км,  $\lambda = 0.5$  мкм и  $\rho \sim 10^3$  кг м<sup>-3</sup>) получаем:

$$l \sim 0.1 \text{ мкм}, \quad I \sim 1.5 \times 10^{-9} I_0,$$

$$l \sim 0.25 \text{ мкм}, \quad I \sim 2.3 \times 10^{-8} I_0,$$

$$l \sim 0.5 \text{ мкм}, \quad I \sim 1.9 \times 10^{-7} I_0.$$

Полученные значения светимости облака хорошо согласуются с вероятными значениями массы вещества, выброшенного при разделении ступеней и размерами дисперсных частиц в облаке. Однако следует отметить, что измеренная интегральная светимость облака соответствует размеру рассеивающих частиц  $0.1 \text{ мкм} < l < 0.25 \text{ мкм}$ , т.е. приближение рэлеевского рассеяния является не вполне корректным.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам анализа последовательности снимков атмосферного оптического явления, сопровождавшего запуск МБР, могут быть сделаны следующие выводы.

Разлет продуктов сгорания и компонентов топлива, выбрасываемых в верхнюю атмосферу при отсечке тяги твердотопливных ракетных двигателей, происходит со скоростями, превышающими  $2 \text{ км с}^{-1}$ .

Практически постоянная скорость расширения облака свидетельствует о том, что оно состо-

ит из достаточно крупных дисперсных частиц, не тормозящихся в верхней атмосфере.

Скорость расширения облака определяется ускорением дисперсной компоненты продуктов сгорания на фронте ударной волны, развивающейся при отсечке тяги твердотопливного двигателя в верхней атмосфере.

Общая картина развития явления соответствует модели, описанной в работах [Платов и др., 2013; Алпатов и др., 2016; Kozlov et al., 2016].

Мы благодарны авторам снимков за возможность использования их фотографий для анализа наблюдавшегося явления.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алпатов В.В., Николайшвили С.Ш., Платов Ю.В., Черноус С.А. Оптические явления, наблюдающиеся при запусках и эксплуатации ракетно-космической техники. С. 437–482. Гл. 9. / Воздействие ракетно-космической техники на окружающую среду. Ред. Адушкин В.В., Козлов С.И., Сильников М.В. М.: ГЕОС. 794 с. 2016.
- 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.
- Николайшвили С.Ш., Платов Ю.В., Черноус С.А. Динамика разлета газопылевого облака, образующегося при выключении твердотопливных ракетных двигателей в верхней атмосфере // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 55. № 5. С. 680–686. 2015.
- Платов Ю.В., Черноус С.А., Алпатов В.В. Особенности оптических явлений, связанных с запусками твердотопливных баллистических ракет // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 53. № 1. С. 209–214. 2013.
- Платов Ю.В., Николайшвили С.Ш. Динамика развития облаков монооксида алюминия, образующихся в верхней атмосфере при запусках твердотопливных ракет // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 58. № 4. С. 573–578. 2018.
- Chernouss S., Platov Yu., Vetcinkin N. Dependence of scales of disturbances in the upper atmosphere on dispersed components of the rocket exhaust. Proc. 24 annual European meeting on atmospheric studies by optical methods, Andenes, Norway 18–22 August 1997. ISBN 82-994583-0-7. P. 140–142. 1998.
- Kozlov S., Nikolayshvili S., Platov Yu., Silnikov M., Adushkin V. Exceptional optical phenomena observed during the operation of Russian launchers // Acta Astronaut. V. 126. September–October. P. 536–540. 2016.
- Platov Yu. Absolute calibration of extended emission objects by stars // Phys. Chem. Earth. V. 25. № 5–6. P. 501–504. 2000.
- S1. <https://www.youtube.com/watch?v=JKdrOGaw9eg>. 2017.
- S2. [https://vk.com/alex\\_626](https://vk.com/alex_626) (accessed December 2017).
- Tagirov V.R., Arinin V.A., Brandstrom U., Pajunpaa A., Klimenko V.V. Atmospheric optical phenomena caused by powerful rocket launches // J. Spacecraft Rockets. V. 37. № 6. P. 812–821. 2000.