

А.М. Самусенко

**ДНЕВНОЕ СВЕЧЕНИЕ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ НА  $\lambda = 589, 330$  и  $285$  НМ ПРИ НАЛИЧИИ В НЕЙ ПАРОВ NaCl**

Рассмотрен механизм дневного свечения Na, образующегося в верхней атмосфере ( $z \geq 80$  км) при фотодиссоциации паров NaCl. Происхождение последних обусловлено антропогенной деятельностью. Показано, что при относительной концентрации NaCl порядка  $10^{-4}$  данный механизм обеспечивает интенсивное свечение возмущенной области пространства в резонансных линиях Na.

В [1, 2] рассмотрены два хемилюминесцентных механизма ночного свечения мезосферы, вызванного взаимодействием продуктов сгорания двигателей летательных аппаратов с окружающей средой. Действие этих механизмов приводит к тому, что ночью на высотах  $z = 80-100$  км интенсивность свечения гидроксила и D-линии натрия в следе (область смещения продуктов сгорания с составляющими атмосферы) может быть на один-два порядка больше, чем в невозмущенной атмосфере.

При изучении дневного свечения следа упомянутые механизмы не играют сколько-нибудь заметной роли в силу того, что днем световой фон намного превосходит интенсивность хемилюминесценции. Однако при подсветке следа, содержащего те же компоненты, что и в [2], солнечным светом имеется другой весьма эффективный механизм образования возбужденного Na\*. Интенсивность его свечения существенно превышает фон не только на длине волны 589, но и 330, и на  $\lambda = 285$  нм. В концептуальном плане постановка данной задачи и метод ее исследования не сильно отличаются от изложенного в [1, 2]. Поэтому ниже обсуждается главным образом различие между дневным и ночным свечением Na в следе.

Одно из основных отличий состоит в том, что днем область свечения натрия ограничена по шкале высот не с двух сторон, а только снизу значением  $z = 80$  км. Наличие нижней границы, как и в [2], связано со стоком Na в химически инертный NaO<sub>2</sub> по каналу 2 (см. табл. 1).

Табл. 1 за исключением реакции 9 идентична аналогичной таблице для ночного свечения [2]. Тем не менее наличие процесса 9 радикально меняет ситуацию, так как теперь именно фотодиссоциация NaCl является основным источником атомарного Na в следе. Данный факт отражает второе важное отличие дневного свечения от ночного. Кроме того, если ночью образование атомарного натрия, в принципе, невозможно без реакций 1 и 3 (это обстоятельство, кстати, и служит ограничением сверху по  $z$  области хемилюминесценции), то в дневных условиях наличие уже одной лишь реакции 9 обеспечивает поступление Na в след на любой высоте, большей 80 км. При этом чем больше высота, тем меньшая доля атомарного Na будет переведена посредством 1–8 в другие его соединения, а начиная с  $z = 100$  км практически весь Na, образовавшийся при фотодиссоциации NaCl, не претерпевает химических превращений вследствие ничтожной роли здесь процессов 1 и 2.

Третье существенное отличие заключается в том, что меняются характерные времена химических процессов. В ночных условиях они составляют доли секунд — секунды. При описании дневного свечения определяющим становится время фотодиссоциации NaCl ( $J_0^{-1} \sim 10^3$  с). Таким образом, если в [1, 2] можно было ограничиться начальной стадией расширения следа (то есть простой зависимостью вида  $R^2 \sim t$ , связывающей радиус следа  $R$  и время  $t$ ), то в данной задаче требуется рассматривать более длительную эволюцию следа. В частности, необходимо учесть, что с увеличением  $t$  расширение следа замедляется и через некоторое время это образование становится устойчивым и подверженным изменению при воздействии лишь внешних атмосферных процессов, а также молекулярной диффузии.

Наконец, еще одно отличие связано собственно с механизмом возбуждения Na\*. Если в ночных условиях это просто хемилюминесцентный механизм, то в дневных главенствующая роль принадлежит резонансной флуоресценции. Именно благодаря возбуждению солнечной радиацией свечение Na в следе возможно не только на длине волны 589 нм, но и на более коротких длинах волн 330 и 285 нм.

Кинетические уравнения будем составлять не для концентраций реагентов, а для их интегрального числа

$$dz \int_0^{R(t)} [X] 2\pi r dr \equiv dz \{X\} \quad (1)$$

( $[X]$  — концентрация химического элемента  $X$ ,  $r$  — текущая координата вдоль радиуса следа) в слое вертикально ориентированного цилиндрически симметричного следа толщиной  $dz$  [1, 2]. Такой упрощенный подход позволяет исключить из рассмотрения влияние динамических процессов на изменение величины  $[X]$ . Платой за упрощение служит то, что в конечном итоге удастся определить лишь средние значения концентраций согласно формуле

$$[\overline{X}] = \{X\}/\pi R^2(t). \quad (2)$$

Основываясь на кинетической схеме, приведенной в табл. 1, с помощью (1) и (2) можно получить:

$$\begin{aligned} \frac{d\{\text{NaO}\}}{dt} &= \kappa_1 [\text{O}_3] \{\text{Na}\} - (\kappa_3 [\text{O}] + \kappa_4 [\overline{\text{H}_2\text{O}}] + \kappa_5 [\overline{\text{H}_2}] + \kappa_6 [\overline{\text{HCl}}]) \{\text{NaO}\}; \\ \frac{d\{\text{Na}\}}{dt} &= -\kappa_1 [\text{O}_3] \{\text{Na}\} - \kappa_2 [\text{O}_2] [M] \{\text{Na}\} + \{\text{NaO}\} (\kappa_3 [\text{O}] + 0,2\kappa_5 [\overline{\text{H}_2}]) + J_9^\infty \{\text{NaCl}\}; \\ \frac{d\{\text{NaO}_2\}}{dt} &= \kappa_2 [\text{O}_2] [M] \{\text{Na}\} - \kappa_8 [\overline{\text{HCl}}] \{\text{NaO}_2\}; \\ \frac{d\{\text{NaOH}\}}{dt} &= \kappa_4 [\overline{\text{H}_2\text{O}}] \{\text{NaO}\} + 0,8\kappa_5 [\overline{\text{H}_2}] \{\text{NaO}\} - \kappa_7 [\overline{\text{HCl}}] \{\text{NaOH}\}; \\ \frac{d\{\text{NaCl}\}}{dt} &= -J_9^\infty \{\text{NaCl}\} + (\kappa_6 \{\text{NaO}\} + \kappa_7 \{\text{NaOH}\} + \kappa_8 \{\text{NaO}_2\}) [\overline{\text{HCl}}]. \end{aligned} \quad (3)$$

Таблица 1

Основные реакции в дневном следе с участием натрия на высотах 80—100 км

Реакция	$\kappa$ , $\text{см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$	$\tau_{\text{хим}}$ , с
1. $\text{Na} + \text{O}_3 \rightarrow \text{NaO} + \text{O}_2$	$3,1 \cdot 10^{-10}$	20
2. $\text{Na} + \text{O}_2 + \text{N}_2 \xrightarrow{\beta} \text{O}_2 + \text{N}_2$	$6,7 \cdot 10^{-31} e^{290/T}$	10—10 <sup>3</sup>
3а. $\text{NaO} + \text{O} \rightarrow \text{NaO}_2 + \text{O}_2$	$3,7 \cdot 10^{-10}$	0,005—0,2
3б. $\text{NaO} + \text{O} \rightarrow \text{Na} (^2P) + \text{O}_2$		
4. $\text{NaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NaOH} + \text{OH}$	$2,2 \cdot 10^{-10}$	0,001—0,01
5а. $\text{NaO} + \text{H}_2 \rightarrow \text{NaOH} + \text{H}$	$2,6 \cdot 10^{-11}$	0,005—0,05
5б. $\text{NaO} + \text{H}_2 \rightarrow \text{Na} + \text{H}_2\text{O}$		
5в. $\text{NaO} + \text{H}_2 \rightarrow \text{Na} (^2P) + \text{H}_2\text{O}$		
6. $\text{NaO} + \text{HCl} \rightarrow \text{NaCl} + \text{OH}$	$2 \cdot 10^{-10}$	0,001—0,01
7. $\text{NaOH} + \text{HCl} \rightarrow \text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$	$2 \cdot 10^{-10}$	0,001—0,01
8. $\text{NaO}_2 + \text{HCl} \rightarrow \text{NaCl} + \text{HO}_2$	$2,3 \cdot 10^{-10}$	0,001—0,01
9. $\text{NaCl} + h\nu \xrightarrow{J^\infty} \text{Na} + \text{Cl}$	$(1-2) \cdot 10^{-3}$	$\sim 10^3$

Примечания. 1. Величины  $\rho$  и  $J^\infty$  измеряются соответственно в  $\text{см}^{-6} \cdot \text{с}^{-1}$  и  $\text{с}^{-1}$ . Скорость  $J^\infty$  оценена на основании данных по сечениям фотодиссоциации [3] для потока излучения, падающего перпендикулярно на границу атмосферы при спокойном Солнце (см., например, [4]).

2. Величины  $\tau_{\text{хим}}$  — характерные времена изменения концентраций реагентов, содержащих в своем составе Na.

3. Типичный состав продуктов сгорания топлива летательных аппаратов включает в себя  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{HCl}$ , а также малые примеси металлов и их соединений (Na, NaCl и т. д.) [5, 6].

Даже без учета динамических членов система (3) сложна. Однако есть ряд обстоятельств, позволяющих упростить ее. Из табл. 1 видно, что характерные времена химического превращения соединений NaO, NaO<sub>2</sub> и NaOH составляют доли секунды. Эти времена чрезвычайно малы по сравнению с характерным временем задачи  $J^{-1} \sim 10^3$  с. Ясно, что при значениях  $t$ , сравнимых с  $J^{-1}$ , величины  $\{\text{NaO}\}$ ,  $\{\text{NaO}_2\}$  и  $\{\text{NaOH}\}$  будут квазистационарны, то есть в соответствующих дифференциальных уравнениях производные по  $t$  можно положить равными нулю. В итоге три из пяти уравнений системы (3) превращаются в алгебраические соотношения и система (3) сводится к системе двух уравнений:

$$\frac{d\{\text{Na}\}}{dt} = -f(t) \{\text{Na}\} + J_9 \{\text{NaCl}\}; \quad \frac{d\{\text{NaCl}\}}{dt} = -J_9 \{\text{NaCl}\} + f(t) \{\text{Na}\}, \quad (4)$$

где

$$f(t) \equiv \frac{\alpha \kappa_1 [\text{O}_3]}{\kappa_3 [\text{O}] \frac{R^2(t)}{R_0^2} + \beta_0} + \kappa_2 [\text{O}_2] [M],$$

$$\alpha \equiv \kappa_4 \overline{[\text{H}_2\text{O}]_0} + 0,8\kappa_5 \overline{[\text{H}_2]_0} + \kappa_6 \overline{[\text{HCl}]_0}, \beta_0 \equiv \alpha + 0,2\kappa_5 \overline{[\text{H}_2]_0}, J_9 \equiv J_9^\infty. \quad (5)$$

Индекс «0» у всех символов соответствует начальным значениям параметров следа.

В дальнейшем необходимо конкретизировать закон расширения следа с изменением времени. Исползованная в [1, 2] зависимость  $R^2(t)$  представляет собой аппроксимацию численных расчетов [7]. Она верна лишь для начальной стадии расширения следа, и, кроме того, базируется на предположении о том, что турбулентный механизм смешения, принятый в [7], справедлив вплоть до  $z = 100$  км. Экстраполяция на большие, чем 100 км, высоты не оправдана вследствие преобладающей роли там других механизмов смешения.

Предположение о том, что на  $z \leq 100$  км турбулентное смешение доминирует при формировании следа, сохранено и в данной статье. Однако теперь следует принять во внимание то, что в дневных условиях нельзя ограничиться одной лишь начальной стадией расширения следа. Характерное время фотодиссоциации  $\text{NaCl} \sim 10^3$  с и, следовательно, источник флуоресценции — атомарный натрий — достигает наибольших концентраций при  $t \gg 100$  с.

В статье [8], которая развивает идеи, заложенные в [7], путем прямых численных расчетов показано, что аналитические результаты, полученные для одномерного приближения, вполне удовлетворительно описывают процесс смешения не только на ранней, но и на более поздних этапах эволюции следа (в расчетах время изменялось от нуля до 600 с). Сами аналитические формулы неудобны для расчетов, однако их анализ показывает, что по крайней мере для  $t \leq 600$  с можно выделить два характерных времени расширения следа: при  $t \leq 250$  с радиус следа увеличивается по закону  $R^2(t) \sim t$  с характерным временем порядка нескольких секунд, а при  $t > 250$  с скорость роста  $R^2(t)$  составляет уже сотни секунд.

Аппроксимация

$$R^2(t)/R_0^2 = \left[ 1 + \frac{\tau_*}{\tau_d} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_*}}) \right], \quad R_0 = ae^{bz} \quad (6)$$

со значениями параметров  $\tau_d = 2,5$  с,  $\tau_* = 500$  с,  $a = 1,4$  м,  $b = 5 \cdot 10^{-5}$  м удовлетворительно описывает результаты [7, 8], хорошо согласуется с [1, 2] для  $t \lesssim 100$  с, а также качественно верно отображает эволюцию следа на больших ( $t \gtrsim 10^3$  с) временах (атмосферные процессы не учитываются). Действительно, если пренебречь влиянием динамических процессов в верхней атмосфере, то след на временах ( $t \gtrsim 10^3$  с) должен представлять собой устойчивое образование с медленно меняющимися параметрами вследствие молекулярной диффузии.

Используя (5) и (6), найдем приближенное решение системы (4)

$$\begin{aligned} \{\text{Na}\} \simeq \{\text{Na}\}_0 e^{-(a_2+J_9)t - \frac{\alpha a_1 \tau_d}{a_3(1+\gamma)} \ln \left[ \frac{(1+\gamma)e^{\frac{t}{\tau_*}} - 1}{\gamma} \right]} + \\ + \frac{J_9}{a_2 + J_9 + \frac{\alpha a_1 \tau_d}{a_3 \tau_* (1+\gamma)}} (\{\text{Na}\}_0 + \{\text{NaCl}\}_0) \left[ 1 - e^{-\left( a_2 + J_9 + \frac{\alpha a_1 \tau_d}{a_3 \tau_* (1+\gamma)} \right) t} \right], \end{aligned} \quad (7)$$

где

$$a_1 \equiv \kappa_1 [\text{O}_3], \quad a_2 \equiv \kappa_2 [\text{O}_2] [M], \quad a_3 \equiv \kappa_3 [\text{O}], \quad \gamma \equiv \frac{\beta \tau_d}{a_3 \tau_*}, \quad \beta \equiv \beta_0 + a_3.$$

Первое слагаемое в (7) описывает убыль Na, содержащегося в исходном составе продуктов сгорания. Второе — генерацию Na при фотодиссоциации NaCl. Так как  $a_2$  квадратично зависит от давления, то на нижней границе ( $z = 80$  км) первый член (7) становится исчезающе малым уже при  $t \sim 10$  с. Второй член за такое же время достигает стационарного значения  $\simeq \frac{J_0}{a_2} \{\text{NaCl}\}_0$  (в продуктах

сгорания  $\{NaCl\}_0 \gg \{Na\}_0$  [5]).

Однако вследствие того, что на 80 км  $J_0/a_2 \ll 1$ , доля переработанного в натрий NaCl невелика. Величина отношения  $J_0/a_2$  близка к единице лишь при  $z \geq 95$  км. Поэтому, начиная только с высот  $\sim 95$  км, практически весь NaCl перерабатывается в Na, но время переработки  $J_0^{-1}$  в отличие от  $z = 80$  км составляет уже  $\sim 500 - 1000$  с.

Вычислим при помощи (2), (6) и (7) средние концентрации натрия в следе для  $z \in 80 - 100$  км. Относительное содержание Na и NaCl в продуктах сгорания примем таким же, как и в [5]:  $c_{Na} = 2 \cdot 10^{-6}$ ,  $c_{NaCl} = 2 \cdot 10^{-4}$ . Начальное распределение  $[Na]_0$  по высоте при  $c_{Na} = 2 \cdot 10^{-6}$  приведено в [2]. Учитывая соотношение  $c_{NaCl}/c_{Na} = 100$ , по распределению  $[Na]_0$  легко получить и распределение  $[NaCl]_0$ . Значения средних концентраций  $[Na]$ , рассчитанные для перечисленных выше параметров, представлены в табл. 2 в широком временном диапазоне.

Следует заметить, что возможна ситуация, когда на  $z \in 80 - 100$  км весь озон, подмешанный в струю, прореагирует за время  $\sim 100$  с после пролета аппарата [1]. Для данной задачи этот факт, однако, не имеет существенного значения. Согласно табл. 1 и структуре первого члена (7) отсутствие озона приведет лишь к уменьшению скорости убыли  $\{Na\}_0$ , что в силу неравенства  $\{NaCl\}_0 \gg \{Na\}_0$  слабо скажется на значении  $\{Na\}$ .

Таблица 2

Значения концентраций  $\overline{[Na]}$  в см

z, км	t, с								
	0**	50	100	250	500	750	1000	2000	5000
80	1,0+8*	3,4+6	2,0+6	9,1+5	5,7+5	4,7+5	4,2+5	3,7+5	3,7+5
82,5	8,4+7	6,8+6	4,0+6	1,8+6	1,1+6	9,4+5	8,4+5	7,4+5	7,4+5
85	7,2+7	1,1+7	7,2+6	3,6+6	2,3+6	1,8+6	1,7+6	1,5+6	1,5+6
87,5	5,8+7	1,1+7	9,1+6	5,7+6	3,8+6	3,1+6	2,8+6	2,4+6	2,4+6
90	4,2+7	1,0+7	9,1+6	7,2+6	5,7+6	4,9+6	4,4+6	3,9+6	3,9+6
92,5	3,5+7	8,9+6	8,3+6	7,4+6	6,6+6	6,1+6	6,0+6	5,3+6	5,3+6
95	2,8+7	7,7+6	7,4+6	7,0+6	7,3+6	7,4+6	7,5+6	7,7+6	7,8+6
97,5	2,2+7	6,3+6	5,9+6	6,1+6	6,4+6	6,9+6	7,3+6	8,4+6	9,1+6
100	1,5+7	4,3+6	4,1+6	4,1+6	4,5+6	4,9+6	5,2+6	6,1+6	6,8+6

\*1,0+8 =  $1,0 \cdot 10^{+8}$ .

\*\*Начальное распределение величины  $[Na]_0$ .

Для  $z > 100$  км формула (6) не применима. На таких высотах из всех механизмов, приведенных в табл. 1, необходимо учитывать только фотодиссоциацию NaCl. Соответственно для нахождения полного числа атомов Na в объеме следа толщиной  $dz$  в системе (4) следует положить  $f(t) = 0$ . Действуя таким образом, для  $z > 100$  км находим

$$\{Na\} = \{Na\}_0 + \{NaCl\}_0 (1 - e^{-J_0 t}). \quad (8)$$

К сожалению, значение  $\{Na\}$  позволяет определять лишь интегральные энергетические характеристики излучения, но не такую, например, дифференциальную величину, как интенсивность  $I$ .

Солнечное излучение, падая на след, содержащий Na, поглощается в одной из резонансных линий и затем в пределах той же линии переизлучается во всех направлениях. На рассматриваемых высотах тушением электронно-возбужденных состояний Na путем столкновений можно пренебречь. Поэтому мощность рассеянного излучения будет равна мощности поглощенного излучения и в этом смысле последняя — вполне адекватная характеристика свечения возмущенной атмосферы. Тем не менее простая связь между излучением и поглощением существует только в случае оптически тонкой среды.

Найдем при помощи данных табл. 2 оптические глубины следа на  $\lambda = 589, 330$  и  $285$  нм (переходы соответственно  $3S \rightarrow 3P$ ,  $3S \rightarrow 4P$  и  $3S \rightarrow 5P$ ) для разных  $z$  и  $t$  в случае, когда вертикально ориентированный след освещается перпендикулярными лучами Солнца. Оптическая глубина вдоль трассы  $l$  вычисляется при помощи формулы

$$\tau = \sigma_0 \overline{[Na]} l, \quad (9)$$

где  $\sigma_0$  — сечение поглощения в центре линии. Подставляя в (9) соответствующие значения параметров задачи, можно установить, что при  $l = 2R$  и  $z > 82,5$  км  $\tau_{589}$  значительно больше единицы для всех приведенных в табл. 2 значений [Na]. Что же касается оптических глубин на двух других длинах волн, то они при любых  $t$  и  $z$  существенно меньше единицы. Это дает право при расчетах  $I_{330}$  и  $I_{285}$  использовать объемное приближение.

Из-за сильного неравенства  $\tau \gg 1$  вычисление интенсивности выходящего излучения в  $D$ -линии Na должно проводиться с использованием уравнения переноса. Это самостоятельная задача, и она выходит за рамки предложенной выше постановки. Наша цель состоит не столько в том, чтобы получить детальные характеристики рассеянного света, сколько в том, чтобы указать на важность самого эффекта рассеяния солнечного излучения на Na, содержащемся в следе. Для ответа на данный вопрос вполне достаточно вычислить интенсивность поглощенной энергии  $I_{589}$ .

В общем случае

$$I_{\nu}^{\text{погл}} = \omega_{\text{экв}} F_{\nu}, \quad (10)$$

где  $\omega_{\text{экв}}$  — эквивалентная ширина линии;  $F_{\nu}$  — поток энергии солнечного излучения. Для доплеровского уширения [9]

$$\omega_{\text{экв}} = 2\gamma_D \left[ \frac{\ln(1 + 1,772 f^* L_*)}{0,693 f^* \left(1 + \frac{2,26}{L_*}\right)} \right]^{1/2}, \quad (11)$$

$$f^* \equiv \frac{0,2 + 0,3L_*}{1 + 0,3L_*}, \quad L_* = 0,47\sigma_0 [\text{Na}] l,$$

где  $\gamma_D$  — доплеровская полуширина линии. Подставляя в (10), (11) параметры  $D$ -линии Na ( $\gamma_D = 13 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$ ,  $\sigma_0^{589,0} = 2\sigma_0^{589,6} = 1,3 \cdot 10^{-11} \text{ см}^2$ ), а также полагая  $F_{589}^{\infty} = 2 \cdot 10^{-16} \text{ Вт/см}^2 \text{ Гц}$  [4] (значение потока солнечного излучения при спокойном Солнце), на основании данных табл. 2 можно определить интенсивность солнечного излучения поглощаемого  $1 \text{ см}^2$  следа на каждой из линий дублета. Для линии 589,0 нм значения величины  $I^{\text{погл}}$  приведены в табл. 3. Интенсивности в линиях дублета связаны между собой соотношением  $I_{589,0} = 2I_{589,6}$ .

Таблица 3

Мощность солнечного излучения, поглощаемая  $1 \text{ см}^2$  следа на 589,0 нм в  $10^{-7} \text{ Вт/см}^2$

$z$ , км	$t$ , с								
	0	50	100	250	500	750	1000	2000	5000
80	10,7	5,3	4,4	3,4	2,8	2,6	2,5	2,3	2,3
82,5	10,6	8,0	7,1	5,8	5,0	4,8	4,7	4,4	4,4
85	10,5	9,7	9,2	8,4	7,8	7,4	7,4	7,2	7,2
87,5	10,3	9,9	10,1	9,9	9,6	9,2	9,2	9,0	9,0
90	9,9	9,9	10,7	10,9	10,9	10,9	10,7	10,7	10,7
92,5	9,7	9,9	10,7	11,1	11,3	11,6	11,6	11,3	11,3
95	9,5	9,9	10,7	11,1	12,0	12,2	12,2	12,4	12,4
97,5	9,2	9,8	10,3	11,1	12,0	12,2	12,4	12,8	13,0
100	8,4	9,2	9,8	10,7	11,3	12,0	12,2	12,4	12,6

Из табл. 3 видно, что в течение длительного промежутка времени  $I_{\text{погл}} \approx 10^{-6} \text{ Вт/см}^2$  практически во всей области высот 80–100 км. Так как вся поглощенная энергия переизлучается, то и интенсивность рассеянного света, просуммированного по всем направлениям, также приблизительно равна  $10^{-6} \text{ Вт/см}^2 \approx 3MR$ . Таким образом, присутствие NaCl в продуктах сгорания порядка сотой доли процента приводит к яркому свечению следа на длине волны 589 нм.

Для тонких линий, каковыми, как отмечалось, являются линии на  $\lambda = 330$  и 285 нм, интенсивность рассеянного излучения находится сразу

$$I_{\nu}^{\text{рас}} = \frac{h\nu}{4\pi} \int \varepsilon dl, \quad (12)$$

$$\varepsilon = \sigma_0 \gamma_D F_\nu [\text{Na}]. \quad (13)$$

Используя значения параметров соответствующих линий и данные табл. 2, для  $z = 85-100$  км и  $t \leq 5000$  с получим в наиболее яркой части следа, т.е. при  $l = 2R(t)I_{330}^{\text{pac}} = (20-100)кR$ ,  $I_{285}^{\text{pac}} \approx 400-200R$ . Интенсивность вдоль любого луча, касательного к окружности радиуса  $r$  с центром на оси цилиндра, в  $(1-r^2/R^2)^{1/2}$  раз меньше приведенных значений.

Детальное исследование вопроса о свечении следа на  $z > 100$  км невозможно из-за отсутствия здесь закона расширения следа в зависимости от времени. Формула (8) в случае оптически тонкой среды позволяет определить лишь интегральные характеристики свечения, такие, например, как суммарная спектральная энергия  $E_\nu$  излучения участка следа единичной длины:

$$E_\nu = h\nu \int_0^R \varepsilon 2\pi r dr = h\nu \sigma_0 \gamma_D F_\nu [\{Na\}_0 + \{NaCl\}_0 (1 - e^{-J_0 t})]. \quad (14)$$

При выводе (14) использованы выражения (8) и (13). Если известен радиус следа, то всенаправленную максимальную (т. е. вдоль радиуса  $R$ ) интенсивность достаточно просто оценить по формуле

$$I_\nu = \frac{2}{\pi} E_\nu / R.$$

Благодаря соотношению  $c_{NaCl}/c_{Na} = 100$ , энергия излучения единицы длины следа за  $t \sim J_0^{-1} \sim 10^3$  с увеличивается в 100 раз при  $\tau \lesssim 1$ .

Согласно принятой нами модели величина  $\{NaCl\}_0$  в расчете на 1 см следа составляет  $\sim 2 \cdot 10^{17}$  молекул. Основываясь на данном факте, найдем максимальные значения величины  $E_\nu$ :

$\lambda$ (нм)	589	330	285
$E_\nu \left( \frac{\text{Вт}}{\text{см}} \right)$	8,6	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$8,3 \cdot 10^{-4}$

Для оптически толстого следа (такая ситуация в  $D$ -линии Na имеет место и при  $z > 100$  км) формула (14) неприменима. Но зато в этом случае величина  $I$  будет мало отличаться от значений интенсивности, приведенных в табл. 3. Причина в том, что для доплеровского уширения величина  $\omega_{\text{экр}}$  при  $\tau > 1$  слабо зависит от оптической глубины.

Итак, нами показано, что на больших высотах выброс Na или NaCl в атмосферу может приводить к сильному изменению ее оптических характеристик. В отличие от ночи, когда продолжительность воздействия выброса на свечение атмосферы сравнительно невелика ( $\sim 100$  с после пролета аппарата [2]), дневное возмущение в свечении атмосферы гораздо больше по времени. Вопрос о длительности свечения может быть решен только после привлечения к рассмотрению дополнительных механизмов, связанных с собственно атмосферными процессами. Именно они, перемешивая возмущенную и невозмущенную части пространства, способствуют уменьшению неоднородности химического состава и, как следствие, приводят к ослаблению  $I_\nu$ .

1. Самусенко А. М. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. № 8. С. 811.
2. Самусенко А. М. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. № 8. С. 821.
3. Silver J. A. et al. // J. Chem. Phys. 1986. V. 84. № 8. P. 4378.
4. Аллен К. У. Астрофизические величины. М.: Мир, 1977.
5. Jensen D. E., Pergament H. S. // Comb. Flame. 1971. V. 17. № 2. P. 115.
6. Jensen D. E., Spalding D. B. et al. // Comb. Flame. 1979. V. 34. № 3. P. 309.
7. Кабашников В. П. // ИФЖ. 1987. Т. 53. № 6. С. 923.
8. Бриль А. И., Кабашников В. П. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1989. Т. 25. № 11. С. 1144.
9. Матвеев В. С. // ЖПС. 1972. Т. 16. № 2. С. 228.

Институт физики АН БССР,  
Минск

Поступила в редакцию  
9 апреля 1990 г.

A. M. Samusenko. Daytime Glow of the Upper Atmosphere at  $\lambda = 589, 330$  and  $285$  nm in the Presence of NaCl Vapors.

The mechanism of daytime glow of Na formed in the upper atmosphere ( $z \geq 80$  km) at NaCl vapors photodissociation is considered. The latter results from anthropogenic activities. It is shown that at a relative NaCl concentration of about  $10^{-4}$  this mechanism provides an intense glow of the disturbed region of space on the resonance lines of Na.