

ИК ИЗЛУЧЕНИЕ ОКСИДА АЗОТА ТЕРМОСФЕРЫ
ПРИ ЕЕ РАЗОГРЕВЕ

Б. Ф. Гордиев, М. Н. Марков

УДК 550.388.8

Теоретически показано, что для области высот 120-500 км при магнитных бурях с разогревом газа до 2500-4000 К концентрация NO достигает 1-10% от общей, объемная плотность ИК излучения - 10^{-3} эрг·см⁻²·с⁻¹. Расчеты объясняют результаты космических экспериментов по измерению ИК излучения и аномально больших концентраций NO и N.

Известно, что при отсутствии геомагнитных возмущений тепловой режим термосферы Земли (высоты $z \geq 120$ км) определяется УФ излучением Солнца (поток $Q \approx 2 - 6$ эрг·см⁻²·с⁻¹), что обеспечивает температуру акзосферы ($z > 250$ км) $T_{ex} \approx 700 - 1800$ К. При этом $\Delta Q/Q \approx \Delta T_{ex}/T_{ex}$. Объясняется этот факт тем, что сток энергии из термосферы вниз контролирует параметры, слабо зависящие от температуры - теплопроводность, излучение атомарного кислорода. При магнитных бурях эмпирические модели [1] дают $T_{ex} \sim 2600$ К, а отдельные эксперименты $T_{ex} \sim 3500$ К [2]. При таком общепринятом подходе это соответствует потокам энергии $\sim 10-30$ эрг/см²·с. Между тем, в ракетных экспериментах 1958-63 гг. наблюдались потоки ИК излучения 10^4 эрг/см²·с [3], а в 1976-77 гг. с ИЗС "Метеор" отмечены случаи потоков 10^3 эрг/см²·с [4] при магнитных бурях. Другие эксперименты давали аномально высокие концентрации NO (до 1%), что также указывало на возможность больших потоков энергии в термосфере ($\geq 10^2$ эрг/см²·с) [5].

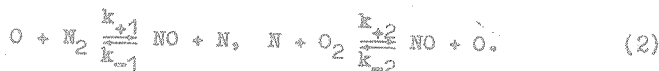
На первый взгляд эти совершенно различные наблюдательные данные не находят разумного объяснения. Однако, опираясь на теорию ИК излучения верхней атмосферы, развитую в [6], они мо-

гут быть легко истолкованы. Необходимо только использовать тот факт, что в ряде магнитных бурь происходит разогрев газа. Эксперимент дает для таких бурь отношение интенсивности линий 6300 Å и 5577 Å атомарного кислорода $10^2 - 10^4$. Поэтому, по-видимому, разогрев происходит с участием электрических полей. Действительно, поля с $E_1 \approx 10^{-2}$ В/м могут обеспечить поток 10 эрг/см²·с. Энергия при этом черпается либо за счет солнечного ветра либо, возможно, за счет вращения Земли. В последнем случае вращающаяся ионосфера выполняет роль униполярного индуктора с ЭДС ~ 100 кВ /7/. Энергия $\sim 10^{25}$ эрг, выделяемая за время $\sim 10^5$ с на площади $\sim 10^{16}$ см², дает поток $\sim 10^4$ эрг/см²·с (локализация во времени и в пространстве происходит за счет плазменных явлений в магнитосфере при взаимодействии с солнечным ветром). Интересно, что замедление вращения Земли при ежемесячных выделениях подобной энергии по порядку величины соответствует принятому в настоящее время значению $\Delta\omega/\omega \approx 10^{-11}$. Энергия вращения Земли трансформируется таким механизмом в энергию ИК излучения.

Для вычисления интенсивности ИК излучения существенно, что концентрация окиси азота - основной излучающей компоненты - увеличивается при повышении температуры. Концентрация $[NO]$ определялась нами как сумма $[NO]_0$ в невозмущенной атмосфере и $\Delta[NO]$ - добавки за счет нагрева. С точностью до множителя 2-3 высотная зависимость $[NO]_0$ может быть представлена в виде

$$[NO]_0 \text{ (см}^{-3}\text{)} \approx \begin{cases} 2,7 \cdot 10^7 \exp\left[-\left(\frac{z-110}{30}\right)^2\right] & \text{при } 90 \text{ км} \leq z \leq 140 \text{ км} \\ 10^7 \exp\left[-\frac{z-140}{3,29 \cdot 10^{-2} \Gamma_{\text{эк}}}\right] & \text{при } z > 140 \text{ км.} \end{cases} \quad (1)$$

Образование и гибель NO происходят за счет следующих основных реакций:



При малых температурах играют роль реакции с k_{+2} и k_{-1} . Но при высоких температурах большой вклад дают реакции с k_{+1} и k_{-2} . Учет их в предположении химического равновесия (в разогретой термосфере это условие для NO и N выполняется вплоть до 500 км) дает выражения для добавок $\Delta[\text{NO}]$, $\Delta[\text{N}]$:

$$\Delta[\text{NO}] = (1/2\gamma) \left\{ \left[([\text{N}]_0 + \gamma[\text{NO}]_0)^2 + 4\gamma k_{+1} [\text{O}][\text{N}_2] / k_{-1} \right]^{1/2} - \right. \quad (3)$$

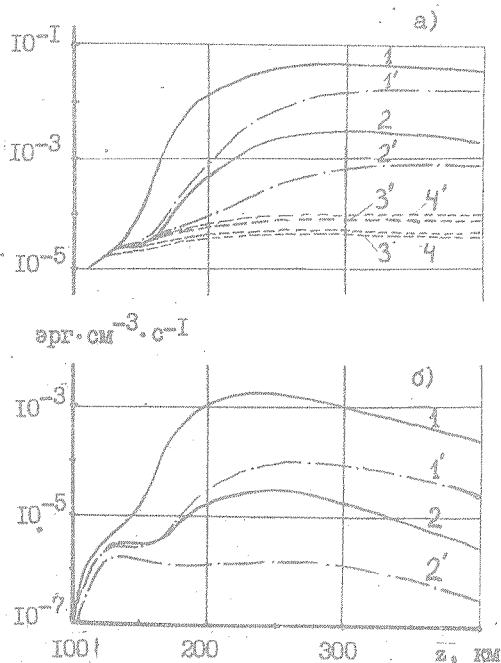
$$\left. - [\text{N}]_0 - \gamma[\text{NO}]_0 \right\}; \quad \Delta[\text{N}] = \gamma\Delta[\text{NO}]; \quad \gamma = (k_{-2}/k_{+2})([\text{O}]/[\text{O}_2]).$$

Мы рассчитали концентрацию $[\text{NO}]$, используя (1) и (3) и применив модель термосферы Якииа-77 /1/. В этой модели высотный профиль температуры есть сумма профиля для невозмущенной среды, для которого было выбрано типичное значение температуры экзосферы $T_{\text{ex}} = 1000$ К и профиля возмущения ΔT :

$$\Delta T(z) = \Delta T_{\text{ex}} \operatorname{arcth}[a(z - z_0)]. \quad (4)$$

Согласно Якииа-77 $a = 6 \cdot 10^{-3} \text{ км}^{-1}$, $z_0 = 90 \text{ км}$, $\Delta T_{\text{ex}} = 0 - 1000 \text{ К}$ (в зависимости от величины геомагнитного возмущения). Концентрация $[\text{N}]_0$, величины a и T_{ex} варьировались. (Для $[\text{NO}]_0$, определяемых формулой (1), величины $[\text{N}]_0 = 10^7$ и 10^8 см^{-3} при $z > 110 \text{ км}$ соответствуют ионизирующим потокам $\sim 2,5$ и $\sim 25 \text{ эрг/см}^2 \cdot \text{с}$.) Из рис. 1а, где представлены результаты расчета, видно, что при $T_{\text{ex}} > 2500 \text{ К}$ содержание NO резко увеличивается, рост может достигать трех порядков величины, а концентрация NO — до 10% от общего числа частиц. Вычисление интенсивности ИК излучения в колебательно-вращательной полосе 5,3 мкм NO проводилось по теории /6/ с учетом возбуждения и дезактивации колебаний в столкновениях с O. Дополнительно рассматривались возбуждение и дезактивация 2-го колебательного уровня и учитывалось (в приближении "уноса излучения") пленение эмиссии в полосе. Для константы дезактивации $k(1 \rightarrow 0)$ использовалось экспериментальное значение $6,5 \cdot 10^{-11} \text{ см}^3/\text{с}$ /8/.

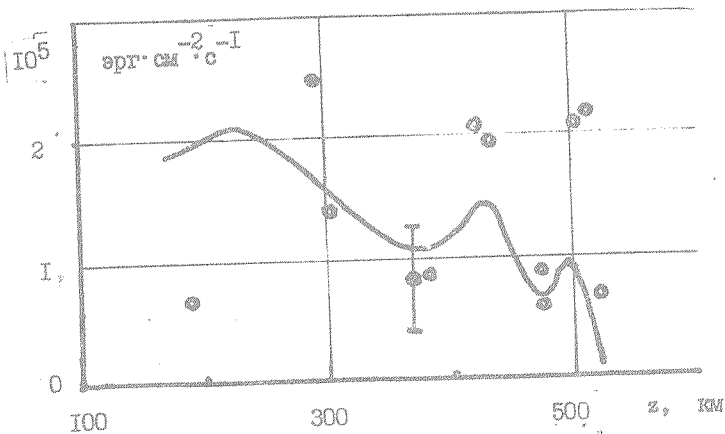
На рис. 1б приведены результаты расчетов излучения. Видно, что при $T_{\text{ex}} = 3500 \text{ К}$ объемная плотность ИК излучения NO достигает $10^{-3} \text{ эрг/см}^2 \cdot \text{с}$. Это означает, что для разогрева газа в 2,5 -



Р и с. 1. Высотные профили относительных объемных концентраций NO (а) и интенсивностей ИК излучения в полосе 5,3 мкм NO (б). Кривые 1, 1', 3, 3' - расчет для $T_{\text{ex}} = 3500$ К, 2, 2', 4, 4 - для $T_{\text{ex}} = 2800$ К. Кривые 1 - 4 - расчет при $a = 9 \cdot 10^{-3} \text{ км}^{-1}$, 1', 4' - при $a = 6 \cdot 10^{-3} \text{ км}^{-1}$. Кривые 3, 3', 4, 4' - профили $[\text{NO}]_0$. Во всех случаях $[\text{N}]_0 = 10^7 \text{ см}^{-3}$.

4 раза требуется потока в $10 - 10^3$ раза превосходящие поток УФ излучения от Солнца. Обеспечение стока такого потока за счет теплопроводности приводило бы к нереально высоким $T_{\text{ex}} 10^4 - 10^5$ К. Иными словами, сток энергий полностью обеспечивается ИК излучением.

В качестве примера интерпретации конкретного эксперимента рассмотрен случай наблюдения вдоль касательных направлений ИК



Р и с. 2. Сравнение расчета (кривая) и эксперимента (точки)

излучения верхней атмосферы в диапазоне 2 – 40 мкм с геофизической ракеты 18 июня 1963 г. во время геомагнитного возмущения /3/.

На рис. 2 приведено сопоставление данных эксперимента и расчета. При расчете по существу решалась "обратная" задача: температурный профиль подбирался таким образом, чтобы профиль излучения соответствовал экспериментальному. При этом оказалось, что $T_{\text{ex}} = 4500$ К, а $\alpha = 9 \cdot 10^{-3} \text{ км}^{-1}$, интенсивность линии 6300 Å составила $187 \text{ эрг/см}^2 \cdot \text{с}$ (возбуждение в столкновениях O-N_2), вертикальный поток ИК излучения $2,8 \cdot 10^4 \text{ эрг/см}^2 \cdot \text{с}$. Узкие слои на высотах 430 и 500 км получены разогревом ионами O^+ , ускоренными электрическими полями с напряженностью $E_1 \sim 10^{-2} \text{ В/м с}$ полуширинами по высоте 30 и 10 км.

Поступила в редакцию
18 мая 1982 г.

Л и т е р а т у р а

1. L. G. Jacchia, SAO Special Report N 375, Smithsonian Inst. Astrophys. Observ. Cambridge Mass (1977).
2. Т. М. Мулярчик, ДАН СССР, 130, № 2, 303 (1960).

3. М. Н. Марков, Я. И. Мерсон, М. Р. Шамидев, в сб. "Исследования космического пространства", "Наука", М., 1965 г., с. 112.
4. В. Г. Сочнев, В. Ф. Тулинов, Космич. исслед., XVII, № 2, 317 (1979).
5. E. S. Zipf, W. L. Borst, T. M. Donahue, Journ. Geoph. Res., 75, 6371 (1970).
6. Б. Ф. Гордеев, М. Н. Марков, Л. А. Шеленин, Труды ФИАН, 105, 7 (1978).
7. Г. Альвен, К. Фельтхаммер, Космическая электродинамика, "Мир", М., 1967 г.
8. R. P. Fernando, W. M. Smith, Chem. Phys. Lett., 66, 218 (1979).