

МОДЕЛЬ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ,
ИЗЛУЧАЮЩЕЙ В ИК ОБЛАСТИ СПЕКТРА

Б. Ф. Гордиен

УДК 551. 510.53; 550.388

Разработана теоретическая модель верхней атмосферы (высоты 90+250 км), излучающей в ИК области спектра (1,2 + 20 мкм). Решена задача о нахождении высотных профилей концентраций малых примесей и интенсивностей в колебательно-вращательных полосах различных молекулярных компонент.

Анализ инфракрасного излучения верхней атмосферы крайне важен для понимания физики процессов, протекающих в ней, излучения ее энергетического режима и энергетической связи с нижней атмосферой. В области спектра $\lambda \geq 1$ мкм, где в большинстве случаев требуются ракетные и спутниковые методы исследования, ряд экспериментов (в том числе пионерских) был выполнен в СССР в ФИАНе, а позже и за рубежом (см. суммирующую работу /1/, ссылки в ней, а также /2/). Недавно анализ ИК излучения верхней атмосферы был проведен с помощью инфракрасного телескопа-спектрометра, установленного на орбитальной пилотируемой станции "Салют-4" /3/.

Проведенные эксперименты и полученные в них интересные результаты стимулировали теоретические исследования. Впервые детальный теоретический анализ различных механизмов ИК излучения верхней атмосферы был выполнен в /4/. Позже эти вопросы теоретически изучались в работах /5-8/. Однако до сих пор еще не был проведен такой детальный анализ характеристик ИК излучения, который позволил бы сопоставлять теорию и эксперимент. Так, например, в работе /7/, где выполнены наиболее детальные расчеты, в анализ не был включен ряд чрезвычайно важных для ИК излучения механизмов и, как следствие этого, оказалось, что полученные результаты не могут объяснить наблюдавшихся в экспериментах больших интенсивностей излучения.

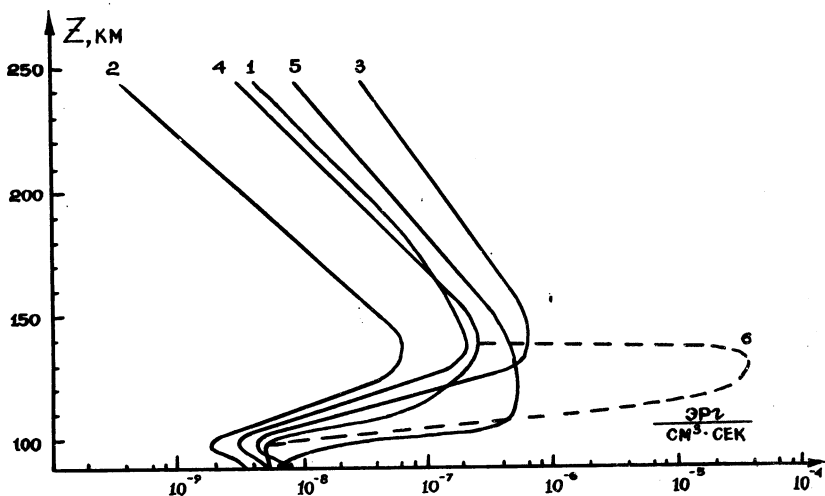
Цель данной заметки - сообщить о разработке нами теоретической модели верхней атмосферы (высоты $z = 90 \text{ км} + 250 \text{ км}$), излучающей в ИК области спектра ($\lambda + 20 \text{ мкм}$). Ставится и решается задача о нахождении высотных профилей интенсивностей излучения различных компонент с учетом всех сколько-нибудь важных известных процессов.

Основное внимание уделяется анализу ИК излучения на колебательно-вращательных переходах молекул NO (5,3 мкм), NO^+ (4,3 мкм); CO (4,7 мкм), $\text{N}^{14}\text{N}^{15}$ (2,2 и 4,4 мкм), OH (2,8 мкм), CO_2 (4,3 и 15 мкм), H_2O (2,7 и 6,3 мкм), N_2O (4,5; 7,8 и 17 мкм), O_3 (9,6 и 14,4 мкм). Рассчитана также интенсивность излучения молекул O_2 ($^1\Delta_g$) на электронном переходе в полосе 1,27 мкм. Поскольку теоретическое исследование ИК излучения неразрывно связано с расчетом концентраций и температур частиц, модель атмосферы включает задачу о нахождении температур электронов (T_e), ионов (T_+), нейтральных частиц (T) и концентраций следующих атмосферных компонент: основных составляющих N_2 , O_2 , O , тепловых электронов, невозбужденных атомов N и ионов N_2^+ , O^+ , N^+ , O_2^+ , NO^+ , метастабильных атомов и ионов $\text{N}(^2D)$, $\text{O}(^1D)$, $\text{O}^+(^2D)$, $\text{O}_2^+(a^4\pi)$, колебательно возбужденных (до уровней $v = 1 \div 12$) молекул $\text{N}_2(v)$, а также "горячих" (с энергией $\gg 3,3 \text{ эв}$) частиц $\text{O}_{\text{гор}}$ и $\text{O}^+_{\text{гор}}$.

Детально модель и результаты расчета будут изложены в отдельных публикациях. Здесь же мы кратко остановимся на основных принципах построения модели, ее особенностях и в качестве иллюстрации приведем некоторые результаты вычислений.

В качестве внешних независимых параметров, определяющих состояние верхней атмосферы и в конечном счете интенсивность ее ИК излучения, выбраны следующие физические характеристики: усредненная за 27-дневный период и текущая (на данный день) интенсивности \bar{S} и S (10^{-22} Вт/см^2) излучения Солнца на волне 10,7 см, характеризующие солнечную активность; местное время t (час), широта местности φ° и угол склонения Солнца δ° ; планетарный индекс геомагнитной активности K_p ; поток энергии Q (эрг/см²), затрачиваемой выпадающими частицами на ионизацию атмосферы; напряженности E_\perp и E_\parallel электрических полей, перпендикулярных или параллельных геомагнитным силовым линиям; относительное содержание паров воды $r^\circ(\text{H}_2\text{O})$ (г/г) на уровне 70 км.

Температура T и концентрации O , O_2 , N_2 рассчитывались из модели СИРА-72. По обычным формулам определялись и концентрации малых составляющих CO , $N^{14}N^{15}$, CO_2 и H_2O , находящихся в гравита-

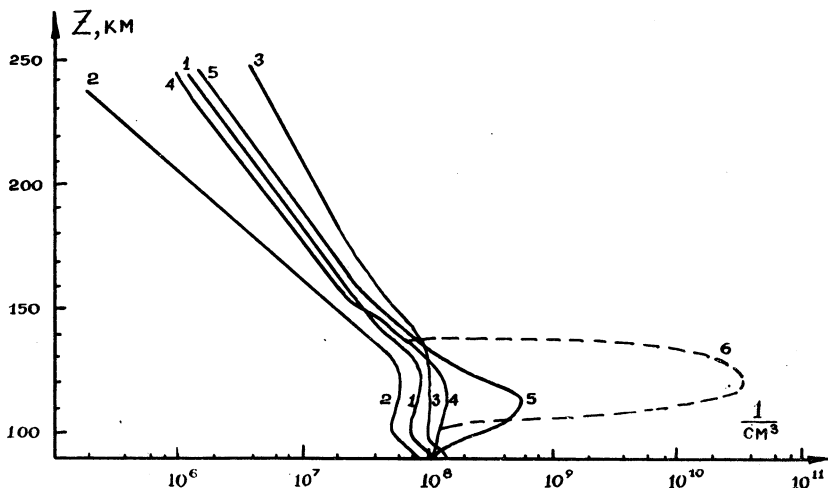


P и с.г. Высотный профиль концентраций молекул NO при различных состояниях атмосферы: (1) $\bar{S} = S = 150$, $t = 12.00$, $\varphi = 45^\circ$, $\delta = 0^\circ$, $K_p = 0$, $Q = 0,3$ эрг/см²сек, $E_{||} = E_{\perp} = 0$, $r^\circ(H_2O) = 5 \cdot 10^{-6}$ г/г; (2) то же, но $\bar{S} = S = 70$; (3) то же, но $\bar{S} = S = 270$. (4) $\bar{S} = S = 150$, $t = 4.00$, $\varphi = 70^\circ$, $\delta = 0^\circ$, $K_p = 3,3$, $Q = 9$ эрг/см²сек. $E_{||} = E_{\perp} = 0$, $r^\circ(H_2O) = 5 \cdot 10^{-6}$ г/г (полярное сияние класса ABC-II); (5) то же, но $K_p = 5,5$, $Q = 90$ эрг/см²сек (полярное сияние класса ABC-III); (6) то же, что и (4), но с $E_{||} = 3 \cdot 10^{-3}$ в/м при $Z_0 \approx 110$ км (полярное сияние класса ABC-II с электрическим полем)

ционно-диффузионном равновесии на высотах ≥ 100 км. В области $90 + 100$ км для них учитывалось важное здесь турбулентное перемешивание, а для CO_2 и H_2O , кроме того, и процесс фотодиссоциации. Для определения N и N_2O использовались литературные данные.

Для температур T_1 , T_e и концентраций всех остальных малых составляющих (включая возбужденные частицы), столкновительные

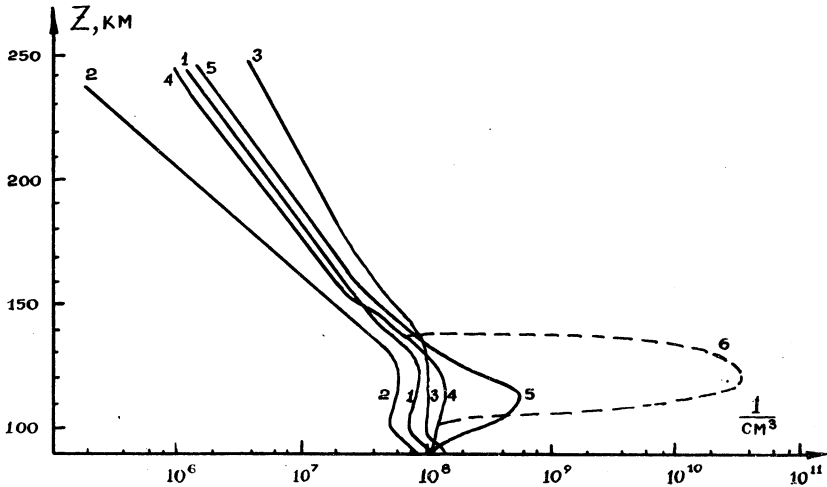
или радиационные времена жизни которых меньше времен турбулентного или диффузионного перемешивания, данная модель является самосогласованной. Это означает, что высотные профили этих кон-



Р и с.2. Высотный профиль объемной интенсивности ИК излучения молекул NO ($\lambda = 5,3$ мкм) при различных состояниях атмосферы. Обозначения те же, что и на рис.1

центраций и температур вычислялись из системы связанных уравнений химической и колебательной кинетики, уравнений баланса заселенностей для электронных метастабильных состояний и уравнений для T и Te. Всего для описания образования и габели частиц и изменения энергии ионов и электронов учитывалось более ста различных процессов. Например, при нахождении концентрации частиц в основном и электронно-возбужденном состоянии рассматривались фотонизация и фотодиссоциация, ионизация и диссоциация быстрыми высыпающимися электронами, диссоциативная рекомбинация, ионно-молекулярные реакции, возбуждение и дезактивация тепловыми электронами и вторичными электронами ионизации, спонтанный радиационный распад метастабильей. Среди механизмов, ответственных за ИК излучение на колебательных переходах молекул, рассматривалось

или радиационные времена жизни которых меньше времен турбулентного или диффузионного перемешивания, данная модель является самосогласованной. Это означает, что высотные профили этих кон-



Р и с.2. Высотный профиль объемной интенсивности ИК излучения молекул NO ($\lambda = 5,3$ мкм) при различных состояниях атмосферы. Обозначения те же, что и на рис.1

центраций и температур вычислялись из системы связанных уравнений химической и колебательной кинетики, уравнений баланса заселенностей для электронных метастабильных состояний и уравнений для T и Te. Всего для описания образования и гравитации частиц и изменения энергии ионов и электронов учитывалось более ста различных процессов. Например, при нахождении концентрации частиц в основном и электронно-возбужденном состоянии рассматривались фотоионизация и фотодиссоциация, ионизация и диссоциация быстрыми выходящими электронами, диссоциативная рекомбинация, ионно-молекулярные реакции, возбуждение и дезактивация тепловыми электронами и вторичными электронами ионизации, спонтанный радиационный распад метастабильей. Среди механизмов, ответственных за ИК излучение на колебательных переходах молекул, рассматривалось

возбуждение колебаний вторичными электронами ионизации, возбуждение и дезактивация колебаний в столкновении с тепловыми электронами, ионами и нейтралами, возбуждение в экзотермических химических реакциях, колебательный обмен между различными молекулами, спонтанные радиационные переходы и возбуждение колебаний резонансным ИК излучением от Солнца и нижних слоев атмосферы Земли.

В качестве иллюстрации на рис. 1 и 2 приведены рассчитанные по данной модели для различных состояний атмосферы высотные профили концентрации и объемной интенсивности ИК излучения в основной полосе 5,3 мкм молекул NO, дающей на высотах ≥ 120 км существенный вклад в общую интенсивность этого излучения.

Важной особенностью данной модели является анализ физико-химических процессов с участием колебательно-возбужденных молекул N_2^* ($v \geq 1$), в том числе в реакции $N_2(v \geq 12) + O \rightarrow NO + N$. Эта реакция, не имеющая энергии активации, может, на наш взгляд, при возбуждении колебаний N_2 разогретыми в электрических полях тепловыми электронами давать важный вклад в образование NO и N. При этом становится возможным количественно объяснить неинтерпретированные до настоящего времени эксперименты по обнаружению больших значений [NO] в полярных сияниях /9/. Для иллюстрации этого на рис. 1 и 2 приведены рассчитанные концентрации и интенсивности NO в полярном сиянии II класса в присутствии поля $E_{||}$ в виде слоя с максимумом на высоте 110 км и полушириной слоя 25 км. Отметим, что при этом заселенности колебательных уровней N_2 рассчитывались по формулам работы /10/ на основе модели ангармонических осцилляторов, что также является особенностью данной модели.

Поступила в редакцию
4 марта 1976 г.

Л и т е р а т у р а

1. M. N. Markov. Appl. Opt., 8, 887 (1969).
2. A. T. Stair, N. B. Wheller, D. J. Baker, C. L. Wyatt. NEREM 73, Res. Boston, Mass. 1973, part 3, N. Y., 1973. p. 80-89 (РЖ "Геофизика" № 8, 8A76, (1974)).
3. М. Н. Марков, Г. М. Гречко, А. А. Губарев, Ю. С. Иванов, В. С. Петров. Препринт ФИАН № 8, 1976 г.

4. Б. Ф. Гордиенц, М. Н. Марков, Л. А. Шелепин. Косм. исслед., 8, 437 (1970).
5. T. C. Degges. Appl. Opt., 10, 1856 (1971).
6. J. B. Kumer, T. C. James. J. Geoph. Res., 79, 638 (1974).
7. R. Bishop, A. Shaw, R. Han, C. McGill. J. Geoph. Res., 79, 1729 (1974).
8. Б. Ф. Гордиенц, М. Н. Марков. ДАН СССР, 227, 84 (1976).
9. E. Zipf, W. Borst, T. Donahue. J. Geoph. Res., 75, 6371 (1970).
10. Б. Ф. Гордиенц, А. И. Осипов, Л. А. Шелепин. ЖЭТФ, 61, 562 (1971).