

УДК 523.47

Н. М. КостогрызГлавная астрономическая обсерватория НАН Украины
03680 Киев, ул. Академика Заболотного, 27**Комбинационное рассеяние в спектре атмосферы Урана
с учетом ее неизотермичности**

Предложен метод определения оптических параметров атмосфер планет-гигантов по данным об интенсивности спектральных деталей комбинационного рассеяния в спектре планеты с учетом реальных температурных профилей. За основу принята методика Мороженко. По наблюдательным данным Каркошки для атмосферы Урана были определены спектральные значения отношений составляющих оптических толщин: аэрозольной и газовой (τ_a/τ_R), поглощательной и рассеивательной ($\tau_c/(\tau_a + \tau_R)$), альbedo однократного рассеяния аэрозольной среды ω (где τ_a , τ_R — аэрозольная и газовая рассеивательные составляющие, τ_c — поглощательная составляющая эффективной оптической глубины формирования интенсивности диффузно отраженного излучения). Отношения τ_a/τ_R в спектральном интервале $\lambda\lambda = 350...450$ нм слабо уменьшаются с увеличением длины волны; их среднее значение равно 0.96.

КОМБІНАЦІЙНЕ РОЗСІЯННЯ В СПЕКТРІ АТМОСФЕРИ УРАНА З УРАХУВАННЯМ ЇЇ НЕІЗОТЕРМІЧНОСТІ, Костогрыз Н. М. — Запропоновано метод визначення оптичних параметрів атмосфер планет-гігантів за даними про інтенсивність деталей комбінаційного розсіяння з урахуванням реальних температурних профілів. За основу прийнята методика Мороженка. За спостережними даними Каркошки для атмосфери Урана були визначені спектральні значення відношень складових оптичних товщин: аерозольної і газової (τ_a/τ_R), поглинальної і розсіювальної ($\tau_c/(\tau_a + \tau_R)$), альbedo однократного розсіяння аерозольної частини ω (де τ_a , τ_R — аерозольна і газова розсіювальні складові, τ_c — поглинальна складова ефективної оптичної глибини формування інтенсивності дифузно відбитого випромінювання). Відношення τ_a/τ_R у спектральному інтервалі $\lambda\lambda = 350...450$ нм слабо зменшується зі збільшенням довжини хвилі; його середнє значення дорівнює 0.96.

RAMAN SCATTERING IN URANUS'S SPECTRUM WITH REGARD TO NONISOTHERMAL ATMOSPHERE, by Kostogryz N. M. — A method for optical parameter estimation of the nonisothermal giant planet atmospheres is developed by using detailed intensity data on Raman scattering. Morozhenko's method was taken as a basis. Using observational data on Uranus's atmo-

sphere, the spectral values for ratio of the components of the optical depth were obtained, namely, aerosol and gas components (τ_a/τ_R), absorbing and scattering constituent components ($\tau_\kappa/(\tau_a + \tau_R)$), and single scattering albedo omega of aerosol constituent ratio (where τ_a , τ_R are aerosol and gas components, and τ_κ is absorbing component of effective optical depth of the formation of the intensity of diffuse reflected radiation). The average value of the ratio τ_a/τ_R is 0.96 but it decreases slowly in the spectral region from 350 to 450 nm.

ВВЕДЕНИЕ

Сравнительно недавно [1, 2] было предложено использовать наблюдательные данные об интенсивности деталей комбинационного рассеяния в спектрах планет-гигантов для определения относительного вклада аэрозольной составляющей атмосфер, в том числе значений отношений составляющих оптических толщин: аэрозольной и газовой (τ_a/τ_R), поглощательной и рассеивательной (τ_κ/τ_R), а также альbedo однократного рассеяния среды при отсутствии эффекта комбинационного рассеяния ω .

В работах [1, 2] рассматривалась модель изотермической атмосферы, тогда как реальные атмосферы планет-гигантов характеризуются довольно сложными температурными профилями [11]. Если в первом случае относительное количество молекул водорода в орто- и парасостояниях не зависит от глубины в атмосфере, то в неизотермической атмосфере — оно будет изменяться с глубиной. По этой причине интенсивность деталей комбинационного рассеяния будет зависеть от эффективной глубины формирования интенсивности диффузно отраженного излучения, и неучет последнего приведет к ошибочности оценок упомянутых выше отношений. В предыдущей нашей работе [7] был предложен метод учета температурного профиля атмосферы при расчете эффектов комбинационного рассеяния, и в рамках чисто модельной задачи оценивалась степень искажения определяемых значений отношений τ_a/τ_R и τ_κ/τ_R . В настоящей работе по данным о спектральных значениях геометрического альbedo [10] и реальном температурном профиле [11] будут оценены значения этих отношений для атмосферы Урана.

МОДЕЛЬ АТМОСФЕРЫ И МЕТОДИКА ВЫЧИСЛЕНИЙ

Как и в работах [2—4, 6, 7], анализ выполнялся при следующих предположениях.

1. Оценки спектральных значений альbedo однократного рассеяния производились путем сравнения наблюдательных данных о геометрическом альbedo [10] с данными расчетов А. Овсака (см. в [5], с. 206) для однородного полубесконечного слоя с двухпараметрической индикатрисой рассеяния Хеньи—Гринстейна при величине первого коэффициента ее разложения в ряд по полиномам Лежандра $x_1 = 0$.

2. Для определения эффективной оптической глубины также использовались расчеты А. Овсака [5].

3. Газовыми составляющими атмосферы являются водород (85 %) и гелий (15 %).

4. Давления, на которых формируются интенсивности диффузно отраженного излучения в коротковолновой области спектра, взяты из работы А. В. Мороженко [6].

Учет эффектов комбинационного рассеяния велся путем внесения

соответствующей поправки в выражение для альbedo однократного рассеяния [12]. Поскольку здесь учитывались только фотоны, перенесенные комбинационным рассеянием на длину волны λ_0 , то в работе А. В. Мороженко и Н. М. Костогрыз [7] была предложена модификация выражения в виде

$$\omega = \frac{\tau_a/\tau_R + D}{1 + \tau_a/\tau_R + \tau_c/\tau_R}, \quad (1)$$

учитывающая и те фотоны, которые комбинационным рассеянием перенесены с длины волны λ_0 . Здесь

$$D = 1 + 0.85 \frac{(N_0\tau_{S(0)} + N_2\tau_{O(2)})f_{\lambda_1} + N_1\tau_{S(1)}f_{\lambda_2} + \tau_{Q(1)}f_{\lambda_3}}{f_{\lambda_0}\tau_R} - 0.85 \frac{N_0\tau_{S(0)} + N_2\tau_{O(2)} + N_1\tau_{S(1)} + \tau_{Q(1)}}{\tau_R},$$

N_0 , N_1 , N_2 — количества молекул водорода в орто- и парасостояниях; $\tau_{S(0)}$, $\tau_{S(1)}$, $\tau_{O(2)}$ и $\tau_{Q(1)}$ — оптические глубины комбинационного рассеяния молекулами, обусловленные соответственно вращательными ($j = 0, 1, 2$) и колебательным (Q) переходами; τ_R — оптическая глубина молекулярного рассеяния, f_{λ_i} — интенсивность солнечного излучения на длинах волн, с которых соответствующими переходами в процессе комбинационного рассеяния световой фотон перенесен на длину волны λ_0 . Для наших вычислений использовался спектр Солнца, взятый из работы [8], приведенный к спектральному разрешению 1 нм. Отметим, что здесь не учитывалось различие спектральных зависимостей коэффициентов комбинационного и рэлеевского рассеяний [9].

На основе выражения (1) и предположения, что в узком ($\Delta\lambda = 10$ нм) участке спектра отношение τ_a/τ_R практически не зависит от λ , методом наименьших квадратов подбиралось такое его значение, которое обеспечивало минимальный разброс рассчитанных значений $\tau_c/\tau_S = \tau_c/(\tau_a + \tau_R) = (\tau_c/\tau_R)/[1 + (\tau_a/\tau_R)]$. При этом τ_a/τ_R варьировалось с шагом 0.03 в пределах от 0 до 3. Усредняя все значения τ_a/τ_R на участке спектра $\lambda\lambda = 350...450$ нм, где почти нет полос поглощения метана, находилась зависимость τ_c/τ_S от длины волны ($\tau_S = \tau_a + \tau_R$).

После определения значения τ_a/τ_R , величина альbedo однократного рассеяния исправлялась за эффект комбинационного рассеяния и оценивалось его истинное значение ω' для газовой-аэрозольной среды с помощью выражения

$$\frac{1}{\omega'} = \frac{D + \tau_a/\tau_R}{(1 + \tau_a/\tau_R)\omega}.$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом, в рамках данной работы была разработана методика учета реального температурного профиля при определении характерных параметров атмосферы τ_a/τ_R , τ_c/τ_R и τ_c/τ_S . Используя предлагаемую методику, получено значение отношений оптических толщин аэрозольной и газовой составляющей для модели неизотермической атмосферы ($\tau_a/\tau_R = 0.96$) и зависимость τ_c/τ_S от длины волны.

На рис. 1 приведено сравнение наблюдательных значений τ_c/τ_S , которые

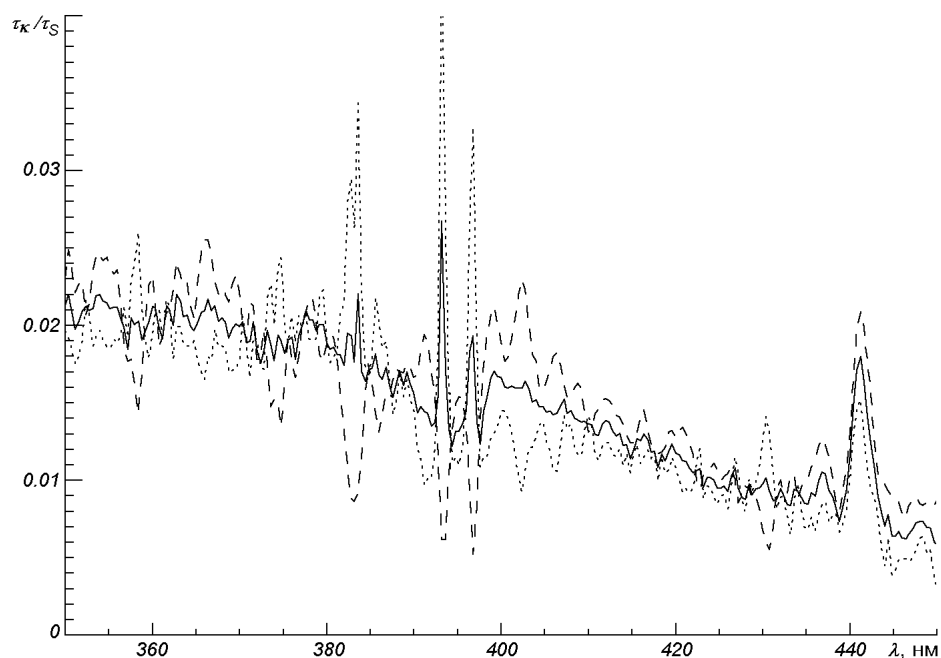


Рис. 1. Отношения поглощательной и рассеивательной составляющих оптической толщины газа и аэрозоля в зависимости от длины волны для неизотермической атмосферы Урана. Штриховая линия — наблюдательные данные, пунктир — расчеты для случая чисто газовой атмосферы ($\tau_a/\tau_R = 0$), сплошная линия — истинное значение τ_k/τ_s при $\tau_a/\tau_R = 0.96$

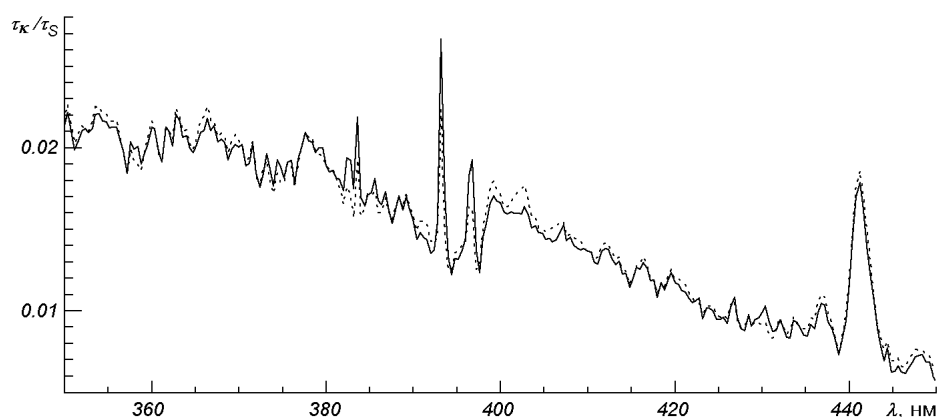


Рис. 2. Отношения поглощательной и рассеивательной составляющих оптической толщины газа и аэрозоля в зависимости от длины волны. Сплошная линия — для неизотермической атмосферы Урана при $\tau_a/\tau_R = 0.96$, пунктир — для изотермической атмосферы с эффективной температурой 57.1 К при $\tau_a/\tau_R = 1.5$

определяются из выражения $\tau_k/\tau_s = 1/\omega - 1$, рассчитанных при условии чисто газовой атмосферы ($\tau_a/\tau_R = 0$) и при значении $\tau_a/\tau_R = 0.96$. Видно, что именно при $\tau_a/\tau_R = 0.96$ значение τ_k/τ_s имеет минимальное отклонение в усредненном спектральном ходе этой величины.

В работе [7] было показано, что неучет реального температурного профиля атмосферы планеты может приводить к большим ошибкам при определении значений τ_a/τ_R , τ_k/τ_R и τ_k/τ_s . Здесь мы проверили этот вывод на реальных значениях этих параметров и для реального температурного

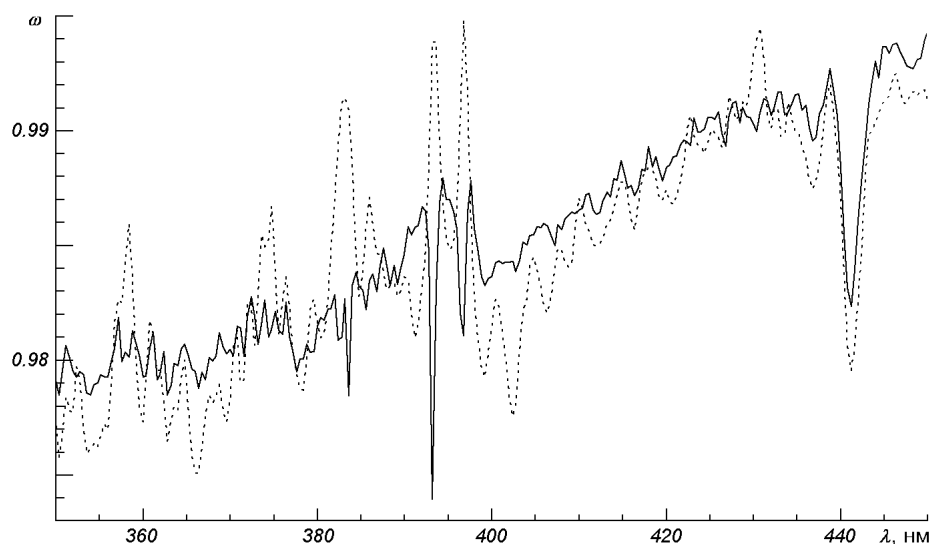


Рис. 3. Зависимость альбедо однократного рассеяния от длины волны для неізотермической атмосферы Урана: пунктир — наблюдательное значение альбедо однократного рассеяния, сплошная линия — истинное значение альбедо однократного рассеяния, исправленное за комбинационное рассеяние

профиля атмосферы Урана. Были рассчитаны также значения этих отношений в предположении изотермической атмосферы с температурой 57.1 К. Полученное значение $\tau_a/\tau_R = 1.5$, т. е. приблизительно на 50 % больше, чем значение, найденного для условий неізотермической атмосферы (рис. 2).

Известно, что эффект комбинационного рассеяния в атмосфере Урана приводит к уменьшению его геометрического альбедо и альбедо однократного рассеяния в коротковолновой области спектра, которое может трактоваться как псевдопоглощение в непрерывном спектре. Используя предложенную методику, мы рассчитали истинное значение альбедо однократного рассеяния ω' и сравнили с полученными значениями непосредственно по наблюдательным данным для $A_g(\lambda)$ (рис. 3).

ВЫВОДЫ

В данной работе для модели неізотермической атмосферы Урана были получены отношения оптических толщин аэрозольной и газовой составляющих планетной атмосферы ($\tau_a/\tau_R = 0.96$) и отношения поглощательной и рассеивательной составляющих оптических толщин аэрозоля и газа $\tau_k/\tau_S = (\tau_k/\tau_R) / [1 + (\tau_a/\tau_R)]$ в зависимости от длины волны.

Подтверждено, что неучет температурного профиля атмосферы приводит к ошибочным значениям параметров атмосферы для Урана, и что такие ошибки составляют около 50 %.

Были получены истинные спектральные значения альбедо однократного рассеяния в неізотермической атмосфере Урана для диапазона длин волн $\lambda = 350...450$ нм.

Автор выражает признательность А. В. Мороженко и А. П. Видьмаченко за советы и полезное обсуждение полученных результатов.

1. Дементьев М. С. Оценка относительного содержания аэрозоля и радиуса частиц в

- атмосфере Урана // Кинематика и физика небес. тел.—1992.—8, № 2.—С. 25—35.
2. *Мороженко А. В.* Комбинационное рассеяние в атмосферах планет-гигантов и оптические свойства атмосферного аэрозоля // Кинематика и физика небес. тел.—1997.—16, № 4.—С. 22—33.
 3. *Мороженко А. В.* Переопределение значений монохроматических коэффициентов поглощения метана с учетом тепловых режимов планет-гигантов. I. Полоса поглощения на $\lambda = 619$ нм // Кинематика и физика небес. тел.—2002.—18, № 4.—С. 376—384.
 4. *Мороженко А. В.* Переопределение монохроматических коэффициентов поглощения метана с учетом тепловых режимов планет-гигантов. II. Юпитер // Кинематика и физика небес. тел.—2003.—19, № 6.—С. 483—500.
 5. *Мороженко О. В.* Методи і результати дистанційного зондування планетних атмосфер. — Київ: Наук. думка, 2004.—646 с.
 6. *Мороженко А. В.* Переопределение монохроматических коэффициентов поглощения метана с учетом тепловых режимов планет-гигантов. III. Уран и Нептун // Кинематика и физика небес. тел.—2006.—22, № 2.—С. 138—153.
 7. *Мороженко А. В., Костогрыз Н. М.* Особенности формирования деталей комбинационного рассеяния в неизотермической атмосфере // Кинематика и физика небес.тел.—2005.—21, № 2.—С. 114—120.
 8. *Delbouille L., Roland G., Neven L.* Photometric atlas of the solar spectrum from 3000 to 10000. — Liege: Univ. press, 1973.
 9. *Ford A. L., Browne J. C.* Rayleigh and Raman cross sections for the hydrogen molecule // Atomic Data 5.—1973.—P. 305—313.
 10. *Karkoshka E.* Spectrophotometry of the Jovian planets and Titan at 300 to 1000 nm wavelength: The methane spectrum // Icarus.—1994.—111, N 3.—P. 967—982.
 11. *Lindal G. F., Lyons J. R., Sweetman D. N., et al.* The atmosphere of Uranus: Results of radio measurements with Voyager 2 // J. Geophys. Res.—1987.—92A, N 3.—P. 14987—15001.
 12. *Pollack J. B., Rages K., Baines K. H., et al.* Estimates of the bolometric albedos and radiation balance of Uranus and Neptune // Icarus.—1986.—65, N 2/3.—P. 442—466.

Поступила в редакцию 25.04.06