

УДК 523.45–852

А. В. Мороженко, А. С. Овсак

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
ул. Академика Заболотного 27, Киев, 03680

О возможности определения мнимой части комплексного показателя преломления аэрозольных частиц в отдельном высотном облачном слое атмосферы Юпитера

Предложен метод для определения значения мнимой части n_i комплексного показателя преломления аэрозольных частиц, формирующих облачный слой, расположенный на определенном высотном участке атмосферы планеты-гиганта. По данным спектральных измерений геометрического альbedo Юпитера (1993 г.) выполнены расчеты величины n_i для всего атмосферного столба и для расположенного в диапазоне давления 0.52...0.78 бар облачного слоя, вероятно сформированного гидросульфидами аммония. Значения n_i , полученные для облачного слоя и для всего атмосферного столба, существенно различаются: 0.00098 и 0.00012 соответственно.

ПРО МОЖЛИВІСТЬ ВИЗНАЧЕННЯ УЯВНОЇ ЧАСТИНИ КОМПЛЕКСНОГО ПОКАЗНИКА ЗАЛОМЛЕННЯ АЕРОЗОЛЬНИХ ЧАСТИНОК У ОКРЕМОМУ ВИСОТНОМУ ХМАРОВОМУ ШАРІ АТМОСФЕРИ ЮПІТЕРА, Мороженко О. В., Овсак О. С. — Запропоновано метод для визначення значення уявної частини n_i комплексного показника заломлення аерозольних частинок, які формують хмаровий шар, розташований на визначеній висотній ділянці атмосфери планети-гіганта. За даними спектральних вимірювань геометричного альbedo Юпітера (1993 р.) виконано обчислення величини n_i для всього атмосферного стовпа і для розміщеного у діапазоні тиску 0.52...0.78 бар хмарового шару, ймовірно сформованого гідросульфідами амонію. Значення n_i , отримані для хмарового шару і для усього атмосферного стовпа, суттєво розрізняються: 0.00098 і 0.00012 відповідно.

ON THE POSSIBILITY OF DETERMINING THE VALUE OF THE IMAGINARY PART OF THE COMPLEX REFRACTIVE INDEX OF AEROSOL PARTICLES IN A SEPARATE ALTITUDINAL CLOUDY

LAYER OF JUPITER'S ATMOSPHERE, by Morozhenko A. V., Ovsak A. S. — The method for determining of value the imaginary part n_i of the complex refractive index of aerosol particles, they forms a cloudy layer, which lays in a particular altitudes level of giant planet's atmosphere, was been developed. We have calculated the value of n_i for both the whole atmospheric column and for the separate cloudy layer with using of spectral data of geometric albedo of Jupiter in 1993. The mentioned cloudy layer has a pressure range of 0.52—0.78 bars and may be compose of hydrosulfide ammonium. The values of n_i obtained for the cloud layer and for the entire atmospheric column differ quite substantially: 0.00098 and 0.00012, respectively.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно современным представлениям о вероятной вертикальной структуре облачного покрова атмосферы Юпитера, основой которых являются работы [12, 24] по термодинамическому моделированию процесса образования облаков в атмосферах планет-гигантов, ниже стратосферной оптически тонкой дымки (см., например, [23]) на различных высотах могут располагаться несколько облачных слоев различной природы [8, 13, 25]. Верхний слой составляют частицы замерзшего аммиака. Ниже находятся два слоя: из частиц гидросульфидов аммония и, вероятно, из смеси кристалликов воды и капель жидкого аммиака. Высотное положение и мощность этих слоев весьма чувствительны к используемому при моделировании количественному содержанию химических элементов в атмосфере Юпитера (рис. 1).

Наличие многослойной структуры у облачного покрова Юпитера подтверждено результатами нефелометрического эксперимента при спуске зонда КА «Галилео» [17], а также оценками вертикальной

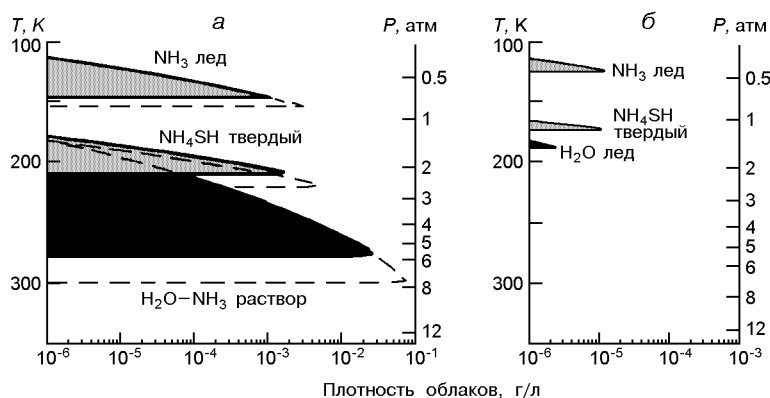


Рис. 1. Модели облаков Юпитера: а — полученная в предположении количества аммиака, сероводорода и воды, соответствующих содержанию азота, серы и кислорода в солнечном веществе (жирные черные линии) и утроенному содержанию этих элементов (пунктирные линии), б — модель облаков в «сухой атмосфере», рассчитанная по данным измерений количества веществ масс-спектрометром зонда КА «Галилео» [9]

структуры объемного коэффициента рассеяния a_a аэрозоля, основанными на анализе данных спектрофотометрических измерений интегрального диска Юпитера [20] и его отдельных широтных участков [7]. Следует отметить, что полученная в работе [20] вертикальная структура облаков близка к результатам термодинамического моделирования, полученным с использованием данных измерений зондом КА «Галилео» количественного содержания веществ в так называемой «горячей точке» атмосферы планеты-гиганта [17] (рис. 1, б).

Поскольку аммиак и вода, не содержащие примесей других веществ, практически не поглощают свет в непрерывном спектре, то можно предположить, что наблюдаемое в атмосфере Юпитера поглощение главным образом обусловлено ее гидросульфид-аммониевым слоем. В то же время имеющиеся на сегодня оценки спектральных значений величины мнимой части n_i комплексного показателя преломления аэрозольных частиц в атмосфере Юпитера [6, 9, 10, 14, 15] характеризуют величины, усредненные для всего многослойного атмосферного столба.

Дело в том, что для этих оценок использовались полученные непосредственно из наблюдательных данных значения альbedo однократного рассеяния аэрозоля

$$a = \frac{\frac{a}{s}}{\frac{a}{s} + \frac{a}{s}}, \quad (1)$$

где $\frac{a}{s}$, — усредненные по всем облачным слоям объемные коэффициенты рассеяния и поглощения аэрозольных частиц, а $\frac{a}{s}$, — суммы рассеивательной и поглощательной составляющих оптической толщины всех аэрозольных слоев. В модели, когда основной вклад в поглощение света атмосферным столбом вносит лишь поглощательная составляющая HS гидросульфид-аммониевого слоя, величина HS , а выражение (1) для этого слоя приобретает вид

$$\frac{^{HS}}{a} = \frac{\frac{a}{s^{HS}}}{\frac{a}{s^{HS}} + \frac{a}{s^{HS}}}, \quad (2)$$

где $\frac{a}{s^{HS}}$ — аэрозольная рассеивательная составляющая его оптической толщины.

Целью настоящей работы является разработка метода расчета величины $\frac{^{HS}}{a}$ для отдельного облачного слоя в атмосфере Юпитера и определение значения мнимой части n_i^{HS} показателя преломления у его аэрозольных частиц.

МЕТОД АНАЛИЗА И ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Определение вертикальной структуры облачных слоев в атмосфере планеты-гиганта выполнялось с использованием метода, основанного на использовании величины эффективной оптической глубины [1—4, 19, 21, 22]. Значение величины n_i аэрозольных частиц в выделенном

облачном слое и ее значение, усредненное для всей толщи атмосферного столба, были рассчитаны по спектральным значениям геометрического альbedo Юпитера, полученным в 1993 г. в полосах поглощения метана с центрами на $\lambda = 619, 727$ и 887 нм [11]. Поскольку методика анализа исходных данных и аналитические формулы для вычисления необходимых физических величин, а также описание специально разработанного комплекса компьютерных программных кодов подробно даны в работах [15, 18, 20], то здесь мы только отметим следующее.

Как и в перечисленных работах, при решении обратной задачи атмосферной оптики использовалась следующая модель полидисперсной аэрозольной среды: действительная часть показателя преломления $n_r = 1.36$, эффективный радиус частиц $r_{\text{эф}} = 0.4$ мкм и дисперсия размеров $\sigma_{\text{эф}} = 0.35$ для модифицированного гамма-распределения частиц по размерам [14, 16]. Поглощение в непрерывном спектре учитывалось по методике, предложенной в работе [15]. Полученные нами при модельных расчетах графические зависимости от давления величин $\alpha_a(P)$ и $\alpha_s(P)$, характеризующие усредненные свойства всех облачных слоев атмосферного столба, показаны на рис. 2 и 3 соответственно. На зависимости $\alpha_a(P)$ видны разрывы между разнесенными по высоте облачными слоями, представленные участками с уменьшенными или постоянными значениями величины α_a . Аналогичная картина ранее была получена в работе [19] для зависимости от давления относительной концентрации аэрозольных частиц $\alpha_s(P)/\alpha_g(P)$ (здесь α_g — газовая рассеивательная составляющая оптической глубины). В то же время значения величины α_s постепенно увеличиваются с увеличением давления, а значит с глубиной в атмосфере (рис. 3).

Высотное расположение и протяженность аэрозольных слоев в верхней части атмосферы Юпитера (рис. 2) можно сопоставить с вертикальной структурой облаков планеты-гиганта, полученной из результатов термодинамического моделирования (рис. 1). В результате верхние аэрозольные слои 1 и 2 на рис. 2 мы отождествили как «дымка» и верхнее аммиачное облако. Тогда слой 3 сформирован частицами гидросульфидов аммония, а слой 4 — это вероятная смесь частиц замерзшей воды и каплеобразного аммиака. Тогда из зависимости $\alpha_a(P)$ (рис. 2) определяется диапазон давления, в котором расположен гидросульфид-аммониевый слой: $P = 0.52 \dots 0.78$ бар, а по нему с помощью зависимости $\alpha_s(P)$ (см. обозначение штриховыми линиями на рис. 3), рассчитывается величина аэрозольной рассеивающей составляющей оптической толщины α_{sHS} слоя.

Полученные значения величин α_{sHS} и α_{HS} , с помощью выражения (2), позволяют рассчитать величину альbedo рассеяния аэрозольных частиц, и согласно методике [15] определить значение величины n_i в интересующем нас облачном слое.

В таблице приведены значения величин, рассчитанные нами для гидросульфид-аммониевого слоя и для всего атмосферного столба:

Рис. 2. Зависимость от давления объемного коэффициента рассеяния аэрозоля σ_a в верхних слоях атмосферы Юпитера [20]. Облачные слои пронумерованы в порядке увеличения глубины их расположения в атмосфере. Стрелками указано положение прослоек

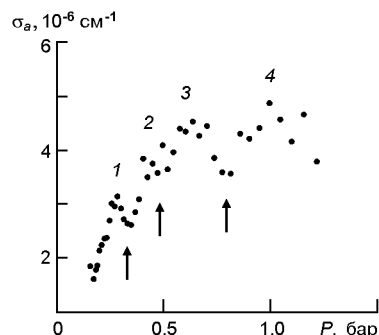
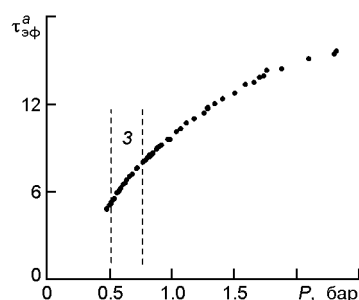


Рис. 3. Зависимость приведенной к длине волны $\lambda = 887.2$ нм величины $\tau_{эф}^a$ от давления P , рассчитанная в полосе поглощения метана на $\lambda = 727$ нм. Вертикальными линиями выделен исследуемый высотный участок 3 атмосферы Юпитера в диапазоне давления 0.52...0.78 бар



Значения параметров, рассчитанные для отдельного облачного слоя и для всего атмосферного столба

Высотная область		σ_s^a	σ_a	n_i
Гидросульфид-аммониевый слой	0.024	3.3	0.993	0.00098
Атмосферный столб	0.024	23.83	0.999	0.00012

поглощательная в непрерывном спектре и рассеивательная аэрозольные составляющие оптической толщины слоя σ_s^a и альbedo рассеяния аэрозольных частиц σ_a , мнимая часть n_i комплексного показателя преломления аэрозольных частиц. Видно, что значение n_i , рассчитанное для отдельного облачного слоя, почти на порядок больше этой величины для всего атмосферного столба.

ВЫВОДЫ

Предложенный метод определения мнимой части комплексного показателя преломления аэрозольных частиц, формирующих облачный слой в определенном высотном участке атмосферы планеты-гиганта, базируется на методике расчета величины n_i для всей толщи атмосферного столба.

Поэтому, к сожалению, ему присущи все недостатки и погрешности расчетов указанной методики, детально рассмотренные в работах [5, 15]. В дополнение к ним отсутствие достоверных данных об истинной природе и высотном расположении облачных слоев в атмосфере Юпитера не позволяет выполнить однозначную привязку высотной структуры объемного коэффициента рассеяния аэрозоля, получаемую

из анализа спектрофотометрических данных. Поэтому предложенный метод определения величины n_i аэрозольных частиц в отдельном облачном слое можно рассматривать как способ экспресс-сравнения характеристик облачного покрова на отдельных участках атмосферы планеты-гиганта или использовать его для анализа свойств отдельных высотных облачных слоев с привлечением усредненных по всему диску данных.

1. *Мороженко А. В.* О структуре облачного слоя Юпитера // Письма в астроном. журн.—1984.—**10**, № 10.—С. 775—779.
2. *Мороженко А. В.* Вертикальная структура широтных облачных поясов Юпитера // Астрон. вестн.—1985.—**19**, № 1.—С. 64—76.
3. *Мороженко А. В.* Проблемы изучения вертикальных структур облачных слоев атмосфер планет-гигантов // Кинематика и физика небес. тел.—1993.—**9**, № 1.—С. 3—26.
4. *Мороженко А. В.* Различие вертикальных структур облачных слоев атмосфер планет-гигантов // Кинематика и физика небес. тел.—2001.—**17**, № 3.—С. 261—278.
5. *Мороженко А. В., Овсак А. С., Видьмаченко А. П., Тейфель В. Г., Лысенко П. Г.* Мнимая часть показателя преломления аэрозоля в широтных поясах диска Юпитера // Кинематика и физика небес. тел.—2016.—**32**, № 1.—С. 43—55.
6. *Мороженко А. В., Яновицкий Э. Г.* Параметры оптической модели атмосферы Юпитера для непрерывного спектра в области 0.35—0.92 мкм // Письма в астроном. журн.—1976.—**2**, № 1.—С. 50—54.
7. *Овсак А. С., Тейфель В. Г., Лысенко П. Г.* Вертикальная структура объемного коэффициента рассеяния аэрозоля в широтных полосах диска Юпитера // Кинематика и физика небес. тел.—2016.—**32**, № 4.—С. 36—47.
8. *Atreya S. K., Wonga A. S., Baines K. H., Wongc M. H., Owen T. C.* Jupiter's ammonia clouds — localized or ubiquitous? // Planet. and Space Sci.—2005.—**53**.—P. 498—507.
9. *Dlugach Z. M., Mischenko M. I.* The effect of aerosol shape in retrieving optical properties of cloud particles in the planetary atmospheres from the photopolarimetric data. Jupiter // Sol. Syst. Res.—2005.—**32**.—P. 102—111.
10. *Dlugach Z. M., Mischenko M. I.* Photopolarimetry of planetary atmospheres: what observational data are essential for a unique retrieval of aerosol microphysics? // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—2008.—**384**.—P. 64—70.
11. *Karkoschka 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.
12. *Lewis J. S.* The clouds of the Jupiter and the NH₃—H₂O and NH₃—H₂S systems // Icarus.—1969.—**10**, N 2.—С. 365—378.
13. *Matcheva K. I., Conrath B. J., Gierasch P. J., Flasar F. M.* The cloud structure of the Jovian atmosphere as seen by the Cassini/CIRS experiment // Icarus.—2005.—**179**, N 2.—P. 432—448.
14. *Mishchenko M. I.* Physical properties of the upper troposphere aerosols in the equatorial region of Jupiter // Icarus.—1990.—**84**, N 2.—P. 296—304.
15. *Morozhenko A. V., Ovsak A. S.* On the possibility of separation of aerosol and methane absorption in the long-wavelength spectral range for giant planets // Kinematics and Physics of Celestial Bodies.—2015.—**31**, N 5.—P. 225—231.

16. *Morozhenko A. V., Yanovitskij E. G.* The optical properties of Venus and Jovian planets. I. The atmosphere of Jupiter according to polarimetric observations // *Icarus*.—1973.—**18**, N 4.—P. 583—592.
17. *Niemann H. B., Atrea S. K., Carignan G. R., et al.* The composition of the Jovian atmosphere as determined by the Galileo probe mass spectrometer // *J. Geophys. Res.*—1998.—**103**, N E10.—P. 22831—22845.
18. *Ovsak A. S.* Upgraded technique to analyze the vertical structure of the aerosol component of the atmospheres of giant planets // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*.—2013.—**29**, N 6.—P. 291—300.
19. *Ovsak A. S.* Changes in the characteristics of the upper layers of the jovian atmosphere from the data on the integral observations of the planetary disk // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*.—2015.—**31**, N 1.—P. 25—32.
20. *Ovsak A. S.* Variations of the volume scattering coefficient of aerosol in the jovian atmosphere from observations of the planetary disk // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*.—2015.—**31**, N4.—P. 197—204.
21. *Ovsak A. S.* Vertical structure of cloud layers in the atmospheres of giant planets. I. On the influence of variations of some atmospheric parameters on the vertical structure characteristics // *Solar Syst. Res.*—2015.—**49**, N 1.—P. 46—53.
22. *Ovsak A. S., Teifel' V. G., Vid'machenko A. P., Lysenko P. G.* Zonal differences in the vertical structure of the cloud cover of Jupiter from the measurements of the Methane absorption bands at 727 and 619 nm // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*.—2015.—**31**, N3.—P. 119—130.
23. *Simon-Miller A. A., Banfield D., Gierasch P. J.* Color and the Vertical Structure in Jupiter's Belts, Zones, and Weather Systems // *Icarus*.—2001.—**154**, N2.—P. 459—474.
24. *Weidenschilling S. J., Lewis L. S.* Atmospheric and cloud structures of the jovian planets // *Icarus*.—1973.—**20**, N 3.—P. 465—476.
25. *West R. A., Tomasko M. G.* Spatially resolved methane band photometry of Jupiter. III: Cloud vertical structures for several axisymmetric bands and the GRS // *Icarus*.—1980.—**41**.— P. 278—292.

Статья поступила в редакцию 26.05.16