

УДК 523.45–852

А. С. Овсак, А. В. Мороженко

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
ул. Академика Заболотного 27, Киев, Украина, 03143
ovsak@mao.kiev.ua, mor@mao.kiev.ua

Уточненная спектральная зависимость мнимой части показателя преломления аэрозоля в атмосфере Юпитера в коротковолновом диапазоне спектра

Предложен метод корректного определения относительного вклада аэрозоля в рассеивательные свойства газовой-аэрозольной среды в непрерывном спектре, который позволил получить более достоверные значения мнимой части n_i комплексного показателя преломления аэрозольных частиц в атмосфере Юпитера в коротковолновой области спектра. По данным измерений в 1993 г. спектральных значений геометрического альбедо Юпитера с применением модели однородных сферических аэрозольных частиц получены значения $n_i = 0.00378, 0.00309, 0.00254, 0.00175, 0.00123, 0.00084, 0.00064, 0.00045, 0.00031, 0.00033, 0.00013, 0.00008$ на длинах волн 320, 350, 375, 400, 420, 450, 470, 500, 520, 550, 606, 631 нм соответственно.

УТОЧНЕНО СПЕКТРАЛЬНА ЗАЛЕЖНІСТЬ УЯВНОЇ ЧАСТИНИ ПОКАЗНИКА ЗАЛОМЛЕННЯ АЕРОЗОЛЮ В АТМОСФЕРІ ЮПІТЕРА В КОРОТКОХВИЛЬОВОМУ ДІАПАЗОНІ СПЕКТРУ, Овсак О. С., Мороженко О. В. — Запропоновано метод коректного визначення відносного вкладу аерозолі у розсіювальні властивості газово-аерозольного середовища у неперервному спектрі, який дозволив отримати достовірніші значення уявної частини n_i комплексного показника заломлення аерозольних часток в атмосфері Юпітера у короткохвильовій області спектру. За даними вимірювань у 1993 р. спектральних значень геометричного альбедо Юпітера з використанням моделі однорідних сферичних аерозольних частинок отримано значення $n_i = 0.00378, 0.00309, 0.00254, 0.00175, 0.00123, 0.00084, 0.00064, 0.00045, 0.00031, 0.00033, 0.00013, 0.00008$ на довжинах хвиль 320, 350, 375, 400, 420, 450, 470, 500, 520, 550, 606, 631 нм відповідно.

CLARIFYING A SPECTRAL DEPENDENCE OF THE IMAGINARY PART OF REFRACTIVE INDEX OF AEROSOLE IN THE ATMOSPHERE OF JUPITER IN THE SHORT WAVES RANGE OF SPECTRUM, by Ovsak A. S., Morozhenko A. V. — A method for correct determining of relative contribution of aerosol into the scattering properties of gas-aerosol medium in continuum spectrum was proposed. As a result, we received the more realistic values of the imaginary part of refractive index of aerosol particles (for the model of homogeneous spheres) in the Jovian atmosphere in the short waves range of spectrum. We used the spectral values of Jupiter's geometric albedo they had been measured in 1993. The assessed value is as follows: $n_i = 0.00378, 0.00309, 0.00254, 0.00175, 0.00123, 0.00084, 0.00064, 0.00045, 0.00031, 0.00033, 0.00013, 0.00008$ at the wavelengths of 320, 350, 375, 400, 420, 450, 470, 500, 520, 550, 606, 631 nm, respectively.

ВВЕДЕНИЕ

В работе [16] при анализе спектрополяризметрических измерений экваториальной области диска Юпитера были определены значения действительной части n_r показателя преломления и параметры функции распределения аэрозольных частиц по размерам. Эти результаты позволили не только получить в работе [6] спектральные значения альбедо $a(\lambda)$ этих частиц, но и впервые оценить значения мнимой части n_i их показателя преломления в непрерывном спектре ($n_i = 0.013, 0.0054, 0.00096, 0.00026, 0.00008, 0.00013, 0.00028$ и 0.00072 на длинах волн 350, 400, 500, 600, 670, 750, 830 и 920 нм соответственно). Отметим, что в работе [16] анализ поляризационных наблюдений велся с приближенным учетом многократного рассеяния и в модели однородных сферических аэрозольных частиц.

Позже подобный анализ, включающий определение значений n_r и n_i , был выполнен со строгим учетом многократного рассеяния, причем сначала в модели сферических частиц [12], а позже и несферических (хаотически ориентированных сфероидов и цилиндров) [7, 8]. Наблюдающееся в работах [7, 8] значительное увеличение n_i в длинноволновой области обусловлено, по нашему мнению, неучетом влияния полос поглощения метана, практически перекрывающихся на длинах волн $\lambda > 600$ нм.

В работе [14] авторами был предложен численный метод выделения аэрозольной поглощающей составляющей, что позволило получить достоверные оценки соотношения значений n_i у частиц атмосферного аэрозоля для ряда широтных полос диска Юпитера [15]. И наконец, в работе [5] предложен метод, а также впервые оценены значения n_i аэрозольных частиц в аммоний-гидросульфидном слое, располагающемся в определенном диапазоне высот атмосферы Юпитера.

В работе [24], посвященной изучению влияния аэрозоля на распределение энергии в атмосфере Юпитера, были подытожены данные

об оптических параметрах аэрозоля. В частности, в ней приведены результаты оценки спектральных значений величин действительной и мнимой составляющих комплексного показателя преломления аэрозольных частиц в диапазоне длин волн 0.2...100.0 мкм. Указанные оценки n_r и n_i получены по данным измерений КА Кассини [21, 23], по результатам лабораторных измерений в искусственно моделируемых условиях атмосфер планет [11], а также рассчитаны по принципу аналогии из данных анализа характеристик атмосферы Титана [10]. Отметим существенные различия спектрального хода и значений величин n_r и n_i в перечисленных работах.

В самой же работе [24] при анализе влияния поглощения солнечного света атмосферным аэрозолем Юпитера в диапазоне 0.2...1.0 мкм использовались значения величины n_i , полученные линейной экстраполяцией значений для двух спектральных точек, определенных ранее в работе [23] (см. рис. 7b в работе [24]).

Поэтому целью данной работы было разработать метод корректного учета влияния газовой рассеивательной составляющей при расчете альbedo аэрозольных частиц $a(\lambda)$ на различных высотных уровнях атмосферы, что позволит рассчитывать спектральные значения величины n_i в коротковолновой части непрерывного спектра планеты-гиганта.

МЕТОД АНАЛИЗА

Оценки значений мнимой части показателя преломления n_i на любой длине волны могут быть получены путем сравнения значений альbedo аэрозольных частиц

$$a(\lambda) / (n_r^2 - n_i^2), \quad (1)$$

получаемых из результатов анализа данных об отражательной способности детали диска планеты (или ее интегрального диска) с величинами, рассчитанными по формулам Ми для заданной модели аэрозоля (сферическая форма однородных частиц, действительная часть их показателя преломления n_r , параметры функции распределения частиц по размерам) при различных значениях n_i . Поскольку реальная атмосфера Юпитера представляет собой газовой-аэрозольную среду, то непосредственно из анализа результатов спектрофотометрических измерений планеты для каждой длины волны оцениваются значения альbedo однократного рассеяния среды ω в непрерывном спектре. Эта величина определяется выражением

$$\omega = (g_g + a) / (g_g + a + k), \quad (2)$$

где g_g , a — рассеивательные составляющие объемного коэффициента ослабления газа и аэрозоля соответственно, k — поглощательная составляющая объемного коэффициента ослабления аэрозоля. С ис-

пользованием выражений (1) и (2) можно перейти к величине α_a с помощью выражения

$$\alpha_a(\lambda) = (1 - \alpha_g(\lambda)) / [1 - \alpha_g(\lambda) - \alpha_a(\lambda)], \quad (3)$$

где величина

$$\alpha_g(\lambda) = \tau_g(\lambda) / (\tau_g(\lambda) + \tau_a(\lambda)) \quad (4)$$

отражает относительный вклад газового рассеяния.

Таким образом, для получения достоверных значений $\alpha_a(\lambda)$ и $n_i(\lambda)$ облачных частиц в исследуемой атмосфере планеты-гиганта, необходимо определить спектральные значения величин $\alpha_g(\lambda)$ и $\tau_a(\lambda)$.

Следует отметить, что впервые подобный анализ был выполнен в работе [6]. Оценки спектральных значений величины n_i в непрерывном спектре получены в ней в рамках модели оптически однородной по вертикали атмосферы, для которой спектральные значения параметра n_i не изменялись с глубиной. Однако, как известно, реальная атмосфера Юпитера является вертикально неоднородной [1—4, 18—20], поэтому и значения параметра n_i изменяются с погружением в глубокие слои атмосферы планеты-гиганта, что необходимо учитывать при определении n_i для каждого конкретного высотного уровня формирующего свой участок спектра планеты.

В предлагаемом методе анализа, аналогично работам [17—19], используются данные спектрофотометрических измерений и расчетные значения эффективной оптической глубины $\tau_{\text{эф}}(\lambda)$ формирования линии поглощения атмосферного метана [22] Юпитера, применяемые для определения параметров вертикальной структуры аэрозольной составляющей его атмосферы.

Метод требует последовательного выполнения следующих этапов вычислений.

1. По данным о спектральной зависимости отражательной способности детали диска планеты или его геометрического альbedo в полосах поглощения атмосферного метана находятся зависимости приведенных к единой длине волны λ_0 значений $\alpha_a(\lambda_0, P_i)$ и $\alpha_g(\lambda_0, P_i)$ от давления P_i , где $\alpha_a(\lambda_0, P_i)$ и $\alpha_g(\lambda_0, P_i)$ — аэрозольная и газовая рассеивательные составляющие эффективной оптической глубины атмосферы.

2. Для выбранной длины волны λ в коротковолновой части непрерывного спектра рассчитываются таблицы значений величин $\alpha_a(\lambda, P_i) = \alpha_a(\lambda_0, P_i) (\lambda_0 / \lambda)^4$, $\alpha_g(\lambda, P_i) = \alpha_g(\lambda_0, P_i) (\lambda_0 / \lambda)^4$, а по ним определяется величина $\alpha_a(\lambda, P_i) = \alpha_g(\lambda, P_i) / (\alpha_g(\lambda, P_i) + \alpha_a(\lambda, P_i))$ в диапазоне значений давления $P_{\min} — P_{\max}$, который заведомо перекрывает вероятные эффективные глубины формирования интенсивности диффузно отраженного излучения на исследуемой длине волны в непрерывном спектре.

3. Выполняется последовательный перебор полученных в п. 2 наборов значений величин для каждого уровня давления. Например, при

анализе высотного уровня с давлением P_i значения параметра (λ, P_i) используются для расчета коэффициентов разложения индикатрисы рассеяния газовой-аэрозольной среды в ряд по полиномам Лежандра:

$$x_i(\lambda, P_i) = (\lambda, P_i) x_i^g + (1 - (\lambda, P_i)) x_i^a(\lambda). \quad (5)$$

4. С использованием значений коэффициентов (5) рассчитывается зависимость от альбедо газовой-аэрозольной среды (λ) значения отражательной способности детали диска или геометрического альбедо планеты. По совпадению рассчитанного значения геометрического альбедо (или отражательной способности детали диска) и данных спектрофотометрических измерений планеты-гиганта на анализируемой длине волны определяется значение альбедо газовой-аэрозольной среды (λ) . По его величине согласно методике [17] рассчитывается значение $a(\lambda, P_i)$, которое затем сравнивается с табличной величиной $a(\lambda, P_i)$.

5. При отсутствии совпадения величин $a(\lambda, P_i)$ и $a(\lambda, P_i)$ выполняется переход к следующему высотному уровню P_{i-1} , и расчеты п. 3 и п. 4 повторяются. При таком последовательном подборе высотного уровня наблюдается постепенное уменьшение разницы значений величин $a(\lambda, P_i)$ и $a(\lambda, P_i)$ до минимальной ее величины при некотором значении давления P , а затем, после прохождения этого уровня, она снова увеличивается. Необходимо отметить, что по данной методике получить точное совпадение значений величин $a(\lambda, P_i)$ и $a(\lambda, P_i)$ практически невозможно, так как получаемая в п. 1 градация по давлению P_i уровней формирования отраженного излучения в полосах поглощения метана определяется спектральными значениями исходных наблюдательных данных в указанных полосах, а расчеты величин в п. 4 выполняются по спектральным значениям наблюдательных данных в непрерывном спектре. Поэтому величина давления глубинного слоя, на котором формируется диффузно рассеянное атмосферой излучение на длине волны в непрерывном спектре, определяется приблизительно.

6. Определенные в п. 5 значения давления P на высотном уровне, значения величин (λ) и (λ, P) позволяют вычислить величину $a(\lambda)$ с помощью выражения (3).

7. Полученное значение величины $a(\lambda)$ сравнивается с модельными значениями альбедо аэрозольных частиц среды, рассчитываемыми по формулам Ми для параметров используемой модели аэрозольной среды при различных значениях величины $n_i(\lambda)$, что и позволяет подобрать величину последнего.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Для получения спектральных значений величины $n_i(\lambda)$ в диапазоне длин волн 320...631 нм были использованы наблюдательные данные о

спектральной зависимости геометрического альbedo Юпитера в 1993 г. [9]. Анализ выполнялся с применением следующих моделей атмосферы и частиц аэрозоля Юпитера, а также коэффициентов поглощения метана:

1) на каждой длине волны атмосфера планеты-гиганта представляет собой полубесконечный оптически однородный газовой-аэрозольный слой. Спектральное значение интенсивности диффузно отраженного света формируется внешней частью атмосферы с эффективной оптической глубиной $\tau_{\text{эф}}(\lambda)$;

2) аэрозоль представлен полидисперсным ансамблем оптически однородных сферических частиц, действительная часть показателя преломления которых не зависит от длины волны и равна $n_r = 1.36$, при модифицированном гамма-распределении по размерам (эффективный радиус $r_{\text{эф}} = 0.4$, дисперсия $v_{\text{эф}} = 0.35$) [12, 16];

3) для модельных расчетов количества поглощающего газа использовались значения объемных монохроматических коэффициентов поглощения метана, переопределенные с учетом физических условий в атмосфере Юпитера [13].

С использованием указанных исходных данных и модельных параметров нами были рассчитаны зависимости от давления P величин $n_a(\lambda, P)$, $n_g(\lambda, P)$ и $n_i(\lambda, P)$ в полосах поглощения метана на 619, 727 и 887 нм. Значения n_i на длинах волн 605.6 и 630.8 нм, находящихся на краях коротко- и длинноволнового крыльев слабой полосы поглощения метана на 619 нм, определялись согласно методике из работы [14].

Остальные значения n_i рассчитывались согласно методике, описанной выше.

Отметим, что при определении спектральных значений величины n_i для $\lambda < 400$ нм использовались данные расчета зависимостей от давления величин $n_a(\lambda, P)$ и $n_g(\lambda, P)$ в полосе поглощения метана на $\lambda = 887$ нм, поскольку из-за существенного поглощения аэрозолями диффузное отражение света происходит лишь от внешней части атмосферы, до сравнительно небольших глубин ($P \approx 0.5$ бар), соответствующих уровням формирования центральной части сильной линии поглощения метана в спектре планеты. Для волн $\lambda > 400$ нм использовались данные расчета величин $n_a(\lambda, P)$ и $n_g(\lambda, P)$ в полосе поглощения на $\lambda = 727$ нм, формирующейся на больших глубинах.

Результаты расчетов приведены в таблице и на рис. 1. Так же, как и в работах [6, 11, 23, 24], в рассматриваемом диапазоне длин волн получено постепенное уменьшение величины n_i с увеличением длины волны. Наиболее вероятной причиной увеличенного на фоне общего хода зависимости значения n_i на длине волны $\lambda = 550$ нм является совместное влияние полос поглощения метана на $\lambda = 542$ нм и аммиака на $\lambda = 552$ нм.

Полученные здесь спектральные значения $n_i(\lambda)$ существенно не отличаются от результатов работы [6] во всем исследованном диапазоне, за исключением $\lambda = 350$ и 400 нм. Причиной такого различия мы

Спектральные значения геометрического альbedo A_g Юпитера и соответствующие им рассчитанные значения параметров газовой-аэрозольной среды

λ , мкм	A_g	P , бар	a	a	n_i	
0.320	0.270	0.309	5.165	0.039	0.953	0.00378
0.350	0.288	0.376	6.163	0.028	0.964	0.00309
0.370	0.307	0.407	6.836	0.022	0.971	0.00254
0.400	0.346	0.537	8.292	0.018	0.981	0.00175
0.420	0.381	0.659	10.347	0.014	0.987	0.00123
0.450	0.420	0.880	12.750	0.012	0.991	0.00084
0.470	0.445	1.115	14.952	0.011	0.994	0.00064
0.500	0.475	1.587	18.184	0.010	0.996	0.00045
0.520	0.492	2.297	20.225	0.011	0.997	0.00031
0.550	0.500	3.058	21.918	0.012	0.997	0.00033
0.606	0.520	31.207	23.371	0.065	0.999	0.00013
0.631	0.522	22.264	23.578	0.040	0.999	0.00008

Рис. 1. Спектральная зависимость мнимой части n_i комплексного показателя преломления облачных частиц в атмосфере Юпитера

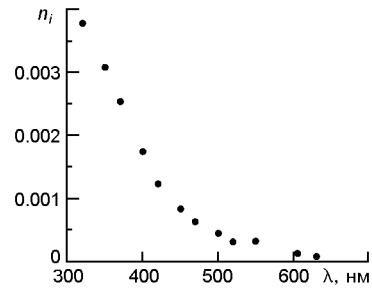
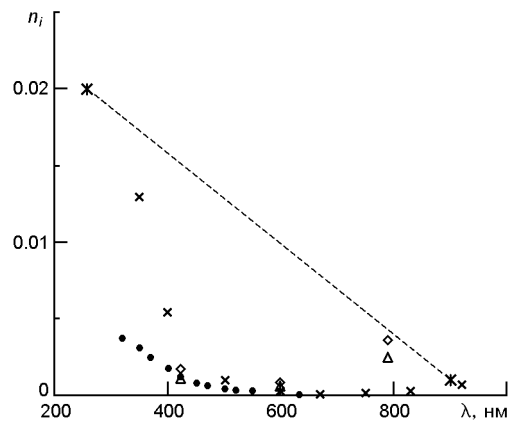


Рис. 2. Вид спектральной зависимости величины $n_i(\lambda)$ у облачных частиц атмосферы Юпитера, полученной в данной работе и в работах [6, 8, 24]



полагаем неучет в работе [6] высотной зависимости величины (λ, P) . Сравнение полученных в данной работе значений величин $n_i(\lambda)$ с данными [7, 8] показывает их соответствие в диапазоне длин волн 420...630 нм (см. рис. 2). В то же время значения $n_i(\lambda)$, использованные в работе [24] для расчета энергетического баланса атмосферы Юпитера, значительно отличаются во всем исследованном спектральном диапазоне.

ВЫВОДЫ

Предложенный метод позволяет определять величину мнимой части $n_i(\lambda)$ показателя преломления аэрозольных частиц в коротковолновой части непрерывного спектра атмосферы планеты-гиганта с использованием данных спектрофотометрических измерений как интегрального диска, так и его отдельных деталей в модели однородных сферических аэрозольных частиц. Рассчитываемый уровень давления глубинного слоя, на котором формируется диффузно рассеянное атмосферой излучение в каждой исследуемой точке коротковолнового диапазона непрерывного спектра, определяется приблизительно. Повысить точность его определения можно при использовании исходных данных с более высоким спектральным разрешением.

Полученные в настоящей работе значения $n_i(\lambda)$ являются результатом анализа отражательных свойств интегрального диска Юпитера, поэтому их необходимо рассматривать в качестве ориентировочных, усредненных величин, которые могут существенно отличаться от значений для конкретных участков планеты.

Авторы благодарны рецензенту за напоминание о необходимости конкретизации используемой нами модели аэрозольных частиц при описании применяемой методики анализа и освещении результатов работы.

1. Морозенко А. В. О структуре облачного слоя Юпитера // Письма в астрон. журн.—1984.—**10**, № 10.—С. 775—779.
2. Морозенко А. В. Вертикальная структура широтных облачных поясов Юпитера // Астрон. вестн.—1985.—**19**, № 1.—С. 64—76.
3. Морозенко А. В. Проблемы изучения вертикальных структур облачных слоев атмосфер планет-гигантов // Кинематика и физика небес. тел.—1993.—**9**, № 1.—С. 3—26.
4. Морозенко А. В. Различие вертикальных структур облачных слоев атмосфер планет-гигантов // Кинематика и физика небес. тел.—2001.—**17**, № 3.—С. 261—278.
5. Морозенко А. В., Обсак А. С. О возможности определения величины мнимой части комплексного показателя преломления аэрозольных частиц в отдельном высотном облачном слое атмосферы Юпитера // Кинематика и физика небес. тел.—2016.—**32**, № 6.—С. 49—55.
6. Морозенко А. В., Яновицкий Э. Г. Параметры оптической модели атмосферы Юпитера для непрерывного спектра в области 0.35—0.92 мкм // Письма в астрон. журн.—1976.—**2**, № 1.—С. 50—54.
7. 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.
8. 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.
9. 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.

10. *Khare B. N., Sagan C., Arakawa E. T., et al.* Optical constants of organic tholins produced in a simulated Titanian atmosphere: from soft X-ray to microwave frequencies // *Icarus*.—1984.—**60**, N 1.—P. 127—137.
11. *Khare B. N., Sagan C., Thompson W. R., et al.* Solid hydrocarbon aerosols produced in simulated Uranian and Neptunian stratospheres // *J. Geophys. Res.*—1987.—**92**.—P. 15067—15082.
12. *Mishchenko M. I.* Physical properties of the upper troposphere aerosols in the equatorial region of Jupiter // *Icarus*.—1990.—**84**, N 2.—P. 296—304.
13. *Morozhenko A. V.* New determination of monochromatic methane absorption coefficients with regard to the thermal conditions in the atmospheres of giant planets. IV. Jupiter and Saturn // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*.—2007.—**23**, N 6.—P. 245—257.
14. *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.
15. *Morozhenko A. V., Ovsak A. S., Vid'machenko A. P., Teifel' V. G., Lysenko P. G.* Imaginary part of the refractive index of aerosol in latitudinal belts of Jupiter's disc // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*.—2016.—**32**, N 1.—P. 30—37.
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. *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.
18. *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**, N 4.—P. 197—204.
19. *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**, N 3.—P. 119—130.
20. *Ragent B., Colburn D. S., Rages K. A., et al.* Results of the Galileo Jupiter mission probe Nephelometer experiment // *J. Geophys. Res.*—1998.—**103**, N E10.—P. 22891—22909.
21. *Vinatier S., Rannou P., Anderson C. M., et al.* Optical constants of Titan's stratospheric aerosols in the 70—1,500 cm^{-1} range constrained by Cassini/CIRS observations // *Icarus*.—2012.—**219**, N 1.—P. 5—12.
22. *Yanovitskij E. G., Ovsak A. S.* Effective optical depth of absorption line formation in semi—infinite planetary atmospheres // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*.—1997.—**13**, N 4.—P. 1—19.
23. *Zhang X., West R. A., Banfield D., Yung Y. L.* Stratospheric aerosols on Jupiter from Cassini observations // *Icarus*.—2013.—**226**, N 1.—P. 159—171.
24. *Zhang Xi, West R. A., Irwin P. G. J., et al.* Aerosol influence on energy balance of the middle atmosphere of Jupiter // *Nat. Commun.*—2015.—**22**; 6:10231.

Статья поступила в редакцию 10.10.16