

УДК 523.45–852

А. В. Мороженко, А. С. Овсак

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

О возможном изменении радиуса и природы аэрозольных частиц в глубоких слоях атмосферы Юпитера

При анализе зависимостей от давления величины объемного коэффициента рассеяния аэрозоля, рассчитанных по данным измерений в 1993 г. геометрического альbedo Юпитера в полосах поглощения метана на 619, 727 и 842 нм, обнаружены признаки вероятного изменения параметров аэрозольных частиц в глубоких слоях атмосферы и впервые оценена величина таких изменений. Выявлено, что в интервале значений давления 4...14 бар возможно увеличение почти в два раза и более эффективного радиуса частиц (не менее 0.73 мкм) и увеличение на 10 % действительной части показателя преломления (от 1.44 и выше) по сравнению со значениями этих параметров в верхней части атмосферы. С учетом этих изменений признаков наличия аэрозоля на глубоких уровнях атмосферы Юпитера не обнаружено.

ПРО МОЖЛИВУ ЗМІНУ РАДІУСА ТА ПРИРОДИ АЕРОЗОЛЬНИХ ЧАСТИНОК У ГЛИБОКИХ ШАРАХ АТМОСФЕРИ ЮПІТЕРА, Мороженко О. В., Овсак О. С. — При аналізі залежностей від тиску величини об'ємного коефіцієнта розсіяння аерозолю, розрахованих за даними вимірювань у 1993 р. геометричного альbedo Юпітера у смугах поглинання метану на 619, 727 і 842 нм, виявлено ознаки ймовірної зміни параметрів аерозольних частинок у глибоких шарах атмосфери і вперше оцінено величину таких змін. В інтервалі значень тиску 4...14 бар можливе майже двократне чи більше збільшення ефективного радіуса частинок (не менше 0.73 мкм) і збільшення на 10 % значення дійсної частини показника заломлення (від 1.44 і вище) порівняно зі значеннями цих параметрів у верхній частині атмосфери планети. З урахуванням цих змін ознак наявності аерозолю на глибоких рівнях атмосфери Юпітера не виявлено.

ON THE POSSIBILITY OF CHANGING OF RADIUS AND IMAGINARY PART OF THE REFRACTIVE INDEX OF AEROSOLE PARTICLES IN THE DEEP LAYERS OF JOVIAN'S ATMOSPHERE, by Morozhenko A. V., Ovsak A. S. — With using of measured data of geometric albedo of Jupiter in 1993 in the absorption bands of methane on 619, 727 and 842 nm, a dependence with pressure of the volume scattering coefficient of aerosol was been calculated. In the deep layers of atmosphere with 4.0...14.0 bars pressure levels a possible changes of aerosol particles parameters was been found. For the first time, we determined possible changing values of those parameters. For the specified depth range in the atmosphere, we observed a nearly two fold and more increasing (up from 0.73 micrometers) of the effective radius of aerosole particles, and increasing of nearly 10 % of the value of real part of the refractive index (more then 1.44), in comparing with the same values in the upper part of the planet's atmosphere. With using of mentioned parameters, no presence of aerosole layer in the deep levels of Jovian atmosphere was been founded.

Согласно результатам моделирования термодинамических процессов в атмосфере Юпитера и современным представлениям о вертикальной структуре ее верхней части [14, 20, 30] на различных высотных уровнях могут располагаться аэрозоли, состоящие из кристаллов аммиака NH_3 (при давлении $P < 1$ бар), гидросульфидов аммония NH_4SH (при $1 < P < 2.8$ бар) и практически перекрывающиеся водные (лед) и аммиачные (в жидкой фазе) облака (при $P > 2.8$ бар). Наиболее вероятно, что на различных высотных уровнях аэрозоль различается как значениями действительной части n_r комплексного показателя преломления, так и параметрами функции распределения частиц по размерам $N(r)$. Это, в частности, подтверждают результаты работ [7, 19, 29]. Например, выполненный в модели однородных сферических частиц, анализ данных о степени круговой поляризации света, отраженного приполярными районами диска Юпитера, показал [19], что соответствие рассчитанных и наблюдаемых значений достигается при значительно больших величинах n_r и эффективного радиуса $r_{\text{эф}}$ частиц, чем дает анализ степени линейной поляризации света для центральной области диска [3, 21, 22]. Это может обуславливаться как различием указанных параметров аэрозоля в экваториальной области и в приполярных участках диска планеты, так и их возможными изменениями с глубиной в атмосфере (см. [10], с. 458). Последнее утверждение основывается на том, что характер спектральной и фазовой зависимости линейной поляризации света, отраженного планетой-гигантом, формируется главным образом одно- и двукратным рассеянием света в верхних слоях атмосферы, а круговой поляризации — многократным рассеянием, включающим и глубокие слои атмосферы [17]. Правда, нельзя исключать еще и возможные различия формы частиц, о чем свидетельствуют работы [15, 16], в которых приведены результаты анализа в рамках модели хаотически ориентированных сплюснутых и вытянутых сфероидов, а также цилиндров.

На возможное увеличение радиуса облачных частиц с глубиной указал анализ спектрофотометрических измерений в месте падения на Юпитер одного из фрагментов кометы Шумейкер — Леви 9, когда взрыв фрагмента открыл глубокие слои атмосферы [7], а также результаты, полученные при спуске зонда КА «Галилео» [24, 29]. И наконец, в работах [12, 27] также было высказано предположение о том, что в атмосфере Юпитера на глубинах с давлением, превышающим 3—4 бар, вероятны изменения размера и природы облачных частиц.

Целью настоящей работы является определение возможных изменений значений параметров n_r и $r_{эф}$ в глубоких слоях атмосферы Юпитера по различиям между зависимостями от давления объемного коэффициента рассеяния аэрозоля $a(P)$, рассчитанными для разных полос поглощения метана. Для анализа мы использовали данные измерений в 1993 г. спектральных значений геометрического альбеда Юпитера [18] в полосах поглощения метана с центрами на $\lambda = 619, 727$ и 842 нм.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Для анализа данных в работе применен метод определения степени отклонения вертикальной структуры в верхней части атмосферы планеты-гиганта от условия однородности [1, 2, 4—6, 8, 9, 11, 25, 26, 28]. Поскольку методика анализа, а также описание специально разработанного комплекса компьютерных программных кодов детально приведены в работах [12] и [27], то здесь мы не будем останавливаться на этих вопросах. При расчетах использовалась базовая модель однородных сферических частиц со значениями параметров $n_r = 1.36$, $r_{эф} = 0.4$ мкм и дисперсии $\sigma_{эф} = 0.35$ при модифицированном гамма-распределении частиц по размерам [21].

Учет поглощения света аэрозолями согласно методике из работы [23], а также расширение спектрального диапазона исходных данных позволили нам получить более достоверный вид зависимости от давления аэрозольной рассеивательной составляющей $a_{эф}(\ln P)$ эффективной оптической глубины атмосферы Юпитера, рассчитанной в полосе поглощения метана на $\lambda = 619$ нм, чем в работах [26] и [27].

На рис. 1, а показаны графические зависимости приведенных к длине волны $\lambda = 887.2$ нм величин $a_{эф}(\ln P)$ (где P — давление в барах), рассчитанные в полосах поглощения метана на $\lambda = 619, 727$ и 842 нм. Анализ этих зависимостей показывает, что в слоях атмосферы с давлением 0.47...2.7 бар наблюдается постоянная высокая скорость увеличения $a_{эф}$ с глубиной, что свидетельствует о наличии там аэрозольных частиц в существенной концентрации. При этом зависимости $a_{эф}$, рассчитанные для всех трех исследуемых полос поглощения метана, практически совпадают друг с другом. Начиная с уровня атмосферы с давлением около 2.7 бар и глубже, скорость роста $a_{эф}$ снижается, что, вероятно, указывает на постепенное разрежение облаков. В слое

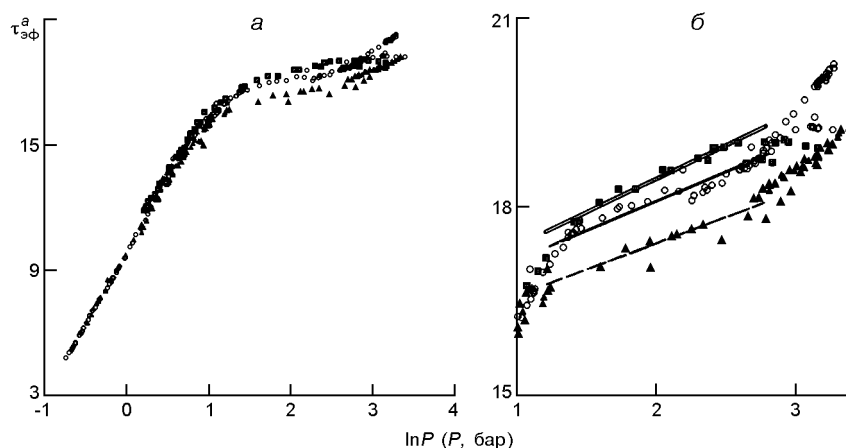


Рис. 1. Зависимости величины $\tau_{\text{эф}}^a(\ln P)$ в полосах поглощения метана на $\lambda = 619, 727$ и 842 нм: *a* — общий вид, *б* — увеличенный масштаб участка со спектральным разделением зависимостей и их линейной экстраполяцией

атмосферы, находящемся в промежутке давлений от 4 до 14 бар, увеличение $\tau_{\text{эф}}^a$ продолжается с постоянной скоростью, но гораздо меньшей, чем в верхних уровнях. На этом высотном участке атмосферы наблюдается четко выраженное спектральное разделение зависимостей $\tau_{\text{эф}}^a$ (см. рис. 1, б). Еще глубже, от уровня с давлением около 16 бар и выше, в полосах на 727 и 842 нм снова наблюдается увеличение скорости роста $\tau_{\text{эф}}^a$, что может указывать на наличие там следующего аэрозольного слоя, о чем уже говорилось в работах [26, 27] и [12].

Учитывая выводы работ [26] и [27] об отсутствии существенной концентрации аэрозольных частиц и работы [13] об однородности глубоких уровней атмосферы Юпитера, участки в диапазоне давлений от 4.0 до 14.0 бар на зависимостях $\tau_{\text{эф}}^a(\ln P)$ для каждой полосы поглощения были экстраполированы прямыми отрезками (см. рис. 1, б). С этой целью мы применили метод наименьших квадратов (линейной регрессии). Затем по экстраполированным данным для указанного участка глубин в атмосфере в каждой полосе поглощения, согласно методике работы [27], но без приведения к одной длине волны, были рассчитаны величины объемного коэффициента рассеяния аэрозоля $\sigma_a(\lambda_i)$. В графе 2 таблицы приведены значения отношений полученных таким образом «экспериментальных» величин $\sigma_a(619)/\sigma_a(727)$, $\sigma_a(619)/\sigma_a(842)$ и $\sigma_a(727)/\sigma_a(842)$. Подчеркнем, что они получены нами при обработке экспериментальных данных, характеризующих глубокие слои атмосферы Юпитера, но с использованием значений параметров аэрозольных частиц, определенных для верхней части атмосферы.

Как уже говорилось выше, для рассматриваемых высотных уровней атмосферы есть основания для предположить возможность изменения значений величин n_r и $r_{\text{эф}}$. Поэтому мы попытались определить величины этих изменений. Для этой цели было использовано соотношение между полученными нами «экспериментальными» величинами

Отношения значений объемных коэффициентов рассеяния в полосах поглощения метана и подобранные значения параметров аэрозольных частиц

$i; j, \text{нм}$	$a(\lambda_i)/a(\lambda_j)$	n_r	$\frac{\sigma_0(\lambda_i)}{\sigma_0(\lambda_j)}$ (при $r_{\text{эф}} = 0.4 \text{ мкм}$)	$r_{\text{эф}}, \text{мкм}$	$\frac{\sigma_0(\lambda_i)}{\sigma_0(\lambda_j)}$ (при $n_r = 1.36$)	$r_{\text{эф}}, \text{мкм}$	$\frac{\sigma_0(\lambda_i)}{\sigma_0(\lambda_j)}$ (при $n_r = 1.45$)
619; 727	1.053	1.44	1.065	0.73	1.052	0.6	1.053
619; 842	1.052	1.47	1.180	0.91	1.052	0.75	1.051
727; 842	0.999	1.49	1.044	1.36	0.999	1.1	0.999

нами объемного коэффициента рассеяния аэрозоля $a(\lambda_i)$ и рассчитываемыми для тех же спектральных диапазонов по формулам Ми объемными коэффициентами рассеяния $\sigma_0(\lambda_i)$ единичного объема полидисперсной аэрозольной среды, заполненной однородными сферическими частицами. В предположении о спектральной независимости параметра n_r аэрозольных частиц, а также при незначительном уровне поглощения ними световой энергии, выполняется соотношение

$$\frac{a(\lambda_i)}{a(\lambda_j)} = \frac{\sigma_0(\lambda_i)}{\sigma_0(\lambda_j)}, \quad (1)$$

где λ_i, λ_j — длины волн в центрах соответствующих полос поглощения метана. Тогда методом подбора модельных параметров среды для каждого из исследуемых спектральных участков в полосах поглощения можно определить такие их значения, при которых с приемлемой точностью выполняется равенство (1).

При определении величины n_r мы принимали неизменным значения параметров $r_{\text{эф}} = 0.4 \text{ мкм}$ и $\alpha_{\text{эф}} = 0.35$. На рис. 2 приведен графический вид зависимостей от параметра n_r величины отношения коэффициентов $\sigma_0(\lambda_i)/\sigma_0(\lambda_j)$, рассчитанных в диапазоне значений $n_r = 1.3 \dots 1.5$. Значения параметра n_r , при которых значение рассчитанного отношения $\sigma_0(\lambda_i)/\sigma_0(\lambda_j)$ наиболее близко к «экспериментальному» значению $a(\lambda_i)/a(\lambda_j)$, а также сами величины $\sigma_0(\lambda_i)/\sigma_0(\lambda_j)$ приведены в графах 3 и 4 таблицы. Моделирование показало, что одним только подбором значения параметра n_r невозможно получить даже приблизительное выполнение равенства (1).

При определении вероятных изменений значений величины $r_{\text{эф}}$ полагались неизменными значения параметров $n_r = 1.36$ и $\alpha_{\text{эф}} = 0.35$. Рассчитанные зависимости $\sigma_0(\lambda_i)/\sigma_0(\lambda_j)$ приведены на рис. 3. Значения эффективного радиуса частиц $r_{\text{эф}}$ и соответствующие им расчетные величины $\sigma_0(\lambda_i)/\sigma_0(\lambda_j)$, при которых практически точно выполняется равенство (1), приведены в графах 5 и 6 таблицы. Из них следует, что в рассмотренном диапазоне давлений вероятное значение эффективного радиуса аэрозольных частиц $r_{\text{эф}} = 0.73 \text{ мкм}$, т. е. он может более чем в два раза превышать размер частиц в верхней части атмосферы.

В графах 7 и 8 таблицы приведены результаты подбора величины параметра $r_{\text{эф}}$ при значении $n_r = 1.45$, т. е. смоделирована ситуация, когда в глубоких слоях изменяются как размеры, так и природа аэрозольных частиц. В этом случае получено $r_{\text{эф}} = 0.59 \text{ мкм}$.

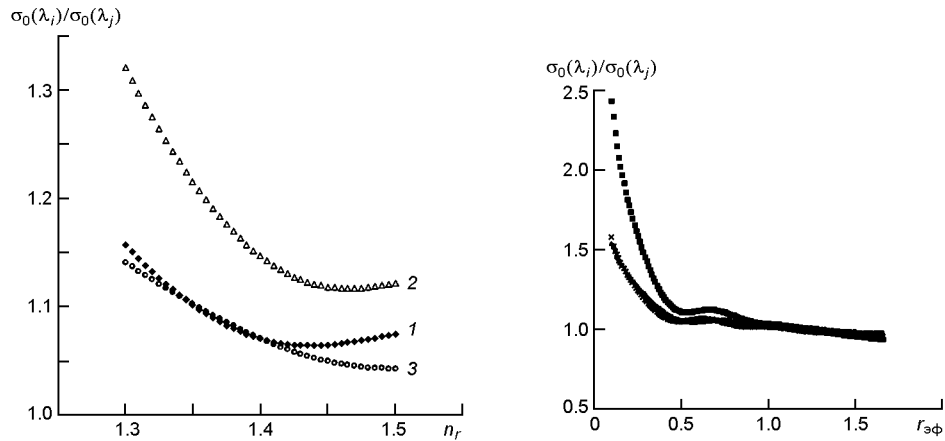


Рис. 2. Зависимость от параметра n_r отношения коэффициентов $\sigma_0(\lambda_i)/\sigma_0(\lambda_j)$, рассчитанных при $r_{эф} = 0.4$ мкм и $\tau_{эф} = 0.35$ в полосах поглощения метана на $\lambda = 619, 727$ и 842 нм

Рис. 3. Зависимость от параметра $r_{эф}$ отношения коэффициентов $\sigma_0(\lambda_i)/\sigma_0(\lambda_j)$, рассчитанных при $n_r = 1.36$ и $\tau_{эф} = 0.35$ в полосах поглощения метана на $\lambda = 619, 727$ и 842 нм

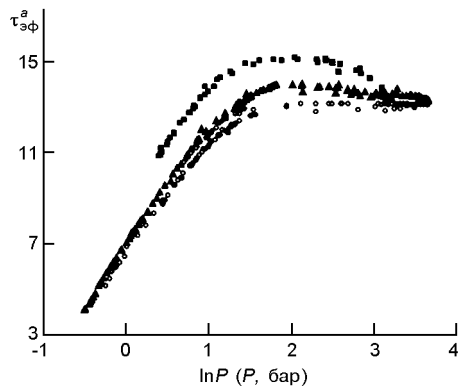


Рис. 4. То же, что на рис. 1, а, но при значении параметра $r_{эф} = 1.25$ мкм

На рис. 4 приведены расчетные зависимости аэрозольной рассеивательной составляющей $\tau_{эф}^a$ от давления в полосах поглощения метана по тем же исходным данным, но при значении параметра $r_{эф} = 1.25$ мкм. Сравнение с рис. 1, а показывает, что при трехкратном увеличении радиуса частиц спектральная зависимость величины $\tau_{эф}^a(\ln P)$ проявляется уже на верхних уровнях атмосферы, а признаки наличия аэрозольного облака в ее глубоких слоях полностью исчезают.

ВЫВОДЫ

Выполненный в работе анализ показал, что по сравнению с верхней частью атмосферы планеты-гиганта в ее глубоких слоях возможны увеличение радиуса частиц в пределах от 0.73 до 1.36 мкм или значения действительной части показателя преломления от 1.44 до 1.49. Согласовать величины экспериментальных и расчетных объемных коэф-

фициентов рассеяния аэрозоля в исследованных полосах поглощения метана одним только изменением величины действительной части показателя преломления не удалось. Моделирование изменений обоих параметров показывает, что, вероятнее всего, в глубоких слоях атмосферы Юпитера происходят оба процесса. Расчет зависимостей от давления величины аэрозольной рассеивательной составляющей оптической глубины атмосферы Юпитера в полосах поглощения метана при трехкратном увеличении радиуса частиц не показал наличия аэрозоля в существенной концентрации в глубоких слоях атмосферы планеты-гиганта. Полученные в работе характеристики являются результатом анализа отражательных свойств интегрального диска Юпитера, поэтому их необходимо рассматривать в качестве ориентировочных, усредненных величин. Характеристики конкретных участков и областей диска планеты могут иметь значительные различия.

1. Дементьев М. С., Мороженко А. В. О вертикальной неоднородности атмосфер Урана и Нептуна // *Астрон. вестн.*—1990.—**24**, № 2.—С. 127—134.
2. Дементьев М. С., Мороженко А. В. Зоны и полосы диска Юпитера. Различия в вертикальной структуре облачных слоев // *Астрон. вестн.*—1990.—**24**, № 4.—С. 275—287.
3. Мороженко А. В. Результаты поляризационных исследований Юпитера // *Астрометрия и астрофизика.*—1976.—Вып. 30.—С. 47—54.
4. Мороженко А. В. О структуре облачного слоя Юпитера // *Письма в Астрон. журн.*—1984.—**10**, № 10.—С. 775—779.
5. Мороженко А. В. Вертикальная структура широтных облачных поясов Юпитера // *Астрон. вестн.*—1985.—**19**, № 1.—С. 64—76.
6. Мороженко А. В. Проблемы изучения вертикальных структур облачных слоев атмосфер планет-гигантов // *Кинематика и физика небес. тел.*—1993.—**9**, № 1.—С. 3—26.
7. Мороженко А. В. Вероятные пределы для размеров частиц и относительных концентраций аэрозоля и метана на уровнях формирования центров полос поглощения метана на 727, 619, 543 и 441 нм в атмосфере Нептуна // *Кинематика и физика небес. тел.*—1999.—**15**, № 2.—С. 110—122.
8. Мороженко А. В. Различия вертикальных структур облачных слоев атмосфер планет-гигантов // *Кинематика и физика небес. тел.*—2001.—**17**, № 3.—С. 261—278.
9. Мороженко А. В., Овсак А. С., Видьмаченко А. П. и др. Мнимая часть показателя преломления аэрозоля в широтных поясах диска Юпитера // *Кинематика и физика небес. тел.*—2016.—**32**, № 1.—С. 43—55.
10. Мороженко А. В., Овсак А. С., Корсун П. П. Вертикальная структура облачного слоя Юпитера до и после столкновения с кометой Шумейкер—Леви-9 // *Кинематика и физика небес. тел.*—1995.—**11**, № 4.—С. 3—20.
11. Мороженко О. В. Методи і результати дистанційного зондування планетних атмосфер. Київ: Наук. думка, 2004.—648 с.
12. 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.
13. Seiff A., Lester P. Final report. Work on planetary atmospheres and planetary atmosphere probes // Grant number NCC 2-471. Jan.81998, http://www.archive.org/details/nasa_techdoc_19990019508
14. Atreya S. K. Composition, clouds, and origin of Jupiter's atmosphere — a case for deep

- multiprobes into giant planets // Proceedings of the International Workshop Planetary Probe Atmospheric Entry and Descent Trajectory Analysis and Science, 6—9 October 2003, Lisbon, Portugal / Ed. by A. Wilson. ESA SP-544, Noordwijk, Netherlands: ESA Publications Division, 2004.—P. 57—62.
15. *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.
 16. *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.
 17. *Hansen J. E.* Circular polarization of sunlight reflected by clouds // *J. Atmos. Sci.*—1971.—**28**, N 5.—P. 1515—1516.
 18. *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.
 19. *Kawata Y., Hansen J. E.* Circular polarization of sunlight reflected by Jupiter // *Jupiter. Tucson, Ariz.*, 1976.—P. 516—530.
 20. *Lewis J. S.* The clouds of the Jupiter and the $\text{NH}_3\text{—H}_2\text{O}$ and $\text{NH}_3\text{—H}_2\text{S}$ systems // *Icarus*.—1969.—**10**, N 2.—P. 365—378.
 21. *Mishchenko M. I.* Physical properties of the upper troposphere aerosols in the equatorial region of Jupiter // *Icarus*.—1990.—**84**, N 2.—P. 296—304.
 22. *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.
 23. *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.
 24. *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.—**103E**, N 10.—P. 22831—22845.
 25. *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.
 26. *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.
 27. *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.
 28. *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.
 29. *Ragent B., Colburn D. S., Rages K. A., et al.* The clouds of Jupiter. Results of the Galileo Jupiter missions probe nephelometer experiment // *J. Geophys. Res.*—1998.—**103E**, N 10.—P. 22891—22909.
 30. *Smith P. H.* The vertical structure of the Jovian atmosphere // *Icarus*.—1986.—**65**, N 2/3.—P. 264—279.

Статья поступила в редакцию 26.05.16