

УДК 523.45-852

**А. С. Овсак<sup>1</sup>, В. Г. Тейфель<sup>2</sup>, А. П. Видьмаченко<sup>1</sup>,  
П. Г. Лысенко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины  
ул. Академика Заболотного 27, Киев, 03680  
e-mail: ovsak@mao.kiev.ua, vida@mao.kiev.ua

<sup>2</sup> Астрофизический институт им. В. Г. Фесенкова, Алматы, Казахстан, 050020  
e-mail: tejf@mail.ru

### **Зональные различия вертикальной структуры облачного покрова Юпитера по измерениям полос поглощения метана 727 и 619 нм**

*Выполнен анализ данных о контурах полос поглощения метана  $\lambda = 619$  и  $727$  нм, полученных в 2013 г. для широтных поясов Юпитера. По спектральным значениям отражательной способности определены изменения с глубиной в атмосфере аэрозольной и газовой составляющих эффективной оптической глубины. Выявлены зональные различия вертикальной структуры облачного покрова Юпитера, даны их численные оценки и определены уровни, на которых вероятно происходили изменения линейного размера или природы аэрозольных частиц. В глубоких уровнях атмосферы обнаружены признаки наличия аэрозольного слоя.*

*ЗОНАЛЬНІ ВІДМІННОСТІ ВЕРТИКАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ ХМАРОВОГО ПОКРИВУ ЮПІТЕРА ЗА ВІМІРЮВАННЯМИ СМУГ ПОГЛІНАННЯ МЕТАНУ 727 ТА 619 НМ, Овсак О. С., Тейфель В. Г., Видьмаченко А. П., Лисенко П. Г. — Виконано аналіз даних про контури смуг поглинання метану  $\lambda = 619$  і  $727$  нм, отриманих для широтних поясів Юпітера у 2013 році. За спектральними значеннями відбивної здатності визначені зміни з глибиною в атмосфері аерозольної та газової складових ефективної оптичної глибини. Виявлені зональні відмінності вертикальної структури хмарового покриву Юпітера, зроблені їхні чисельні оцінки та визначені рівні, де ймовірно відбувалися зміни лінійного розміру чи природи аерозольних часток. У глибоких рівнях атмосфери виявлено ознаки наявності аерозольного шару.*

*ZONAL DIFFERENCES OF VERTICAL STRUCTURE OF THE JUPITER'S CLOUD COVER FROM MEASUREMENTS OF METHANE 727 AND 619 NM ABSORPTION BANDS, by Ovsak A. S., Teifel V. G., Vid'machenko A. P., Lysenko P. G. — We performed an analysis of data on the contours of methane 619 and 727 nm absorption bands obtained in 2013 for the Jupiter's latitudinal belts. Using spectral values of reflectivity, we determined the changes of the behaviour with depth for the optical thicknesses of the aerosol and gas scattering components. We found some differences of vertical structure of the Jupiter's cloud cover in zones, made their numerical evaluation and determined the levels of possible changes in the linear size or nature of aerosol particles. Some evidence of the aerosol layer was revealed in the deep levels of the atmosphere.*

## **ВВЕДЕНИЕ**

Наблюдаемые различия спектрофотометрических, спектрополяризационных и тепловых свойств отдельных деталей диска Юпитера могут быть обусловлены влиянием целого комплекса факторов: природой облачных частиц (т. е. различиями комплексных показателей преломления), параметрами функции распределения частиц по размерам и вертикальной структурой газовой-аэрозольной среды.

Поэтому важной задачей физики планетных атмосфер является конкретизация этих характеристик для каждой детали диска планеты. На сегодня большинство таких характеристик получают путем анализа наблюдательных данных дистанционных измерений. Из применяемых методов дистанционных исследований атмосфер планет-гигантов более или менее достоверные данные о комплексном показателе преломления и параметрах функции распределения облачных частиц по размерам можно получить только из анализа данных о фазовой зависимости степени поляризации отраженного света.

В частности, в работах [4, 25, 29] при определении физических характеристик частиц аэрозоля были использованы наземные наблюдения центральной области диска Юпитера, которая, как известно, включает в себя светлую зону (EZ) и частично темные полосы (SEB, NEB). Поэтому, строго говоря, определенные в этих работах параметры аэрозольных частиц нельзя относить ни к зонам, ни к полосам планеты. Однако из-за отсутствия на сегодняшний день доступных результатов поляриметрии отдельных деталей диска Юпитера при выполнении анализа их спектрофотометрических наблюдений нам приходится предполагать, что атмосферный аэрозоль в различных деталях диска планеты-гиганта имеет одинаковую природу и описывается одним и тем же законом распределения частиц по размерам, что, вероятнее всего, не соответствует действительности. Например, об этом может свидетельствовать попытка в работе [24] получить удовлетворительное согласие между расчетами и наблюдательными данными о

линейной (в центре диска) и круговой (полярные районы) поляризации отраженного света Юпитера. Оказалось, что такое согласие достигается для различных пар значений действительной части показателя преломления и линейного размера частиц, что может отображать изменение с глубиной в атмосфере как параметров функции распределения частиц по размерам, так и природы частиц (см. например, [11], с. 458 и [39]). Вероятным объяснением этих различий может быть то, что в модели сферических или хаотически ориентированных частиц произвольной формы круговая поляризация света приполярных районов формируется многократным рассеянием в толще атмосферы [22], а характер фазовой зависимости линейной поляризации главным образом определяется однократным рассеянием в самых верхних слоях атмосферы [12].

В большинстве работ при изучении различий вертикальной структуры облачных покровов отдельных деталей планеты-гиганта используется метод «центр — край». Он основан на сравнении данных о распределении по диску отражательной способности в непрерывном спектре и в молекулярных полосах поглощения атмосферного газа с соответствующими величинами, рассчитанными в рамках различных моделей вертикальной структуры газовой-аэрозольной среды. Применяемые модели атмосфер планет-гигантов имеют различную сложность: от наиболее простой двухслойной [2, 13] до сложных многослойных структур [36—38]. В многослойных моделях облачный слой представляется несколькими разнесенными по высоте оптически однородными аэрозольными или газовой-аэрозольными слоями конечной оптической толщины, а в верхний надоблачный газовый слой иногда еще включают и разреженный стратосферный мелкодисперсный аэрозоль («дымку»). Впервые «дымка» была обнаружена при наземных наблюдениях эффектов затемнения Юпитером галилеевых спутников и звезд [34], а позже она также была выявлена при выполнении миссии КА «Галилео» [35]. Использование усложненных моделей вертикальной структуры атмосферы Юпитера устранило основной недостаток двухслойной модели, в которой анализ данных для соседних полос поглощения давал существенное различие по высоте расположения в атмосфере одного и того же формирующего их слоя газа. Однако из-за применения до 10 и более свободных параметров, характеризующих отдельные газовой-аэрозольные слои и газовые прослойки между ними, решение получается неоднозначным, о чем говорится, например, в работе [38].

Напомним, что в двухслойной модели атмосферы свободными параметрами являются индикатриса рассеяния  $(\mu)$  аэрозоля, альbedo однократного рассеяния среды в непрерывном спектре  $\mu_c$  и в полосе поглощения атмосферного газа  $\mu_a$ , параметр  $\mu = \mu_R / (\mu_R + \mu_a)$  (здесь  $\mu_R$  и  $\mu_a$  — объемные коэффициенты рассеяния аэрозольной и газовой составляющих нижнего полубесконечного слоя) и поглощательная составляющая оптической толщины  $\tau_a$  надоблачного слоя — в общей

сложности пять параметров. В многослойных моделях каждый из вставляемых слоев характеризуется своим набором значений пяти параметров ( $\mu$ ),  $c$ ,  $\rho$ ,  $\tau$  и  $\sigma$ , к которым еще добавляются значения оптической толщины  $\tau_{gi}$  каждой из газовых прослоек между ними. Поэтому вполне закономерным является то, что в рамках двухслойной модели верхние границы облачных слоев в зонах и полосах могут располагаться на различных высотных уровнях (перепад составляет около 20 км), а в усложненных моделях это различие может полностью исчезать. Еще одним слабым местом метода анализа эффекта «центр — край» является принятие априори оптической однородности атмосферы Юпитера вдоль его широтных поясов, что, конечно, тоже является неверным.

Указанных недостатков в значительной мере лишены поляризационные и тепловые методы анализа, в которых используются наблюдательные данные для какого-либо участка или точки диска. Так, различие степени поляризации вдоль центрального меридиана на фазовом угле 103 при  $\lambda = 440$  нм в модели чисто газового надоблачного слоя указало на различие в 6—10 км высоты верхней границы облачного слоя светлых зон и темных полос [16].

Несколько большее различие (до 16 км) было получено при анализе данных спектрополяриметрии в полосах поглощения метана  $\lambda = 619$  и 727 нм на центральном меридиане диска Юпитера, по которым определялось количество метана в надоблачных слоях EZ, SEB и NEB [3, 7, 10]. Кроме того, анализ данных о различии степени поляризации на центральном меридиане для этих же деталей в длинах волн  $\lambda = 347$ , 410, 452 и 510 нм позволил оценить значения рассеивательной составляющей оптической толщины надоблачного слоя, спектральный ход которой оказался близким к релеевскому. Такой результат говорит либо о фрагментации стратосферной аэрозольной дымки, т. е. она присутствует только над лимбовыми областями диска, либо, что более вероятно, об очень малых размерах ее частиц.

Измерения теплового излучения деталей диска Юпитера также говорят о вариациях его свойств. Определено, что в зонах и полосах оно выходит с различных глубин (см., например, [20]).

Принципиально иной подход к изучению вертикальной структуры параметров газовой-аэрозольной полубесконечной атмосферы был предложен А. В. Мороженко [5]. Его метод анализа не требует использовать предварительные предположения о многослойности вертикальной структуры исследуемой атмосферы планеты-гиганта. Рассчитанные зависимости от количества метана на луче зрения (или от атмосферного давления) отношения величин аэрозольной и газовой рассеивательных составляющих оптической толщины облачного слоя однозначно указывают на наличие отклонения вертикальной структуры от условия однородности и позволяют определить характер и величину такого отклонения.

## ОПИСАНИЕ МЕТОДА А. В. МОРОЖЕНКО

В середине 1960-х гг. Чемберлен [15] высказал предположение о том, что поле диффузно отраженного планетой-гигантом солнечного света формируется не всей толщей атмосферы, а только ее внешней частью до некоторой эффективной оптической глубины  $\tau_{\text{эф}}$ . Эта величина зависит от альbedo однократного рассеяния атмосферы. Поэтому сильные полосы молекулярного поглощения газа формируются в более высоких уровнях атмосферы, чем слабые, а в каждой отдельно взятой полосе ее крылья образуются слоями на больших глубинах, чем центральная часть. Тогда же было впервые записано аналитическое выражение для расчета  $\tau_{\text{эф}}$  в изотропной среде. Э. Г. Яновицкий с коллегами доработал методику определения этой величины для произвольных сред [1, 30, 40], а также предложил иную концепцию определения  $\tau_{\text{эф}}$  и аналитические выражения для ее расчета [14].

Опыт применения величины  $\tau_{\text{эф}}$  для анализа спектрофотометрических данных по методу А. В. Мороженко показал [8], что для получения только качественного представления об отклонении вертикальной структуры атмосферы планеты-гиганта от условия однородности при модельных расчетах достаточно использовать сферическую индикатрису рассеяния. Для получения же значений величин оптической толщины слоя и объемного коэффициента рассеяния аэрозоля на данной глубине при анализе необходимо использовать индикатрису рассеяния, характеристики которой максимально близки к реальной среде. Как показали работы [18, 19], форма аэрозольных частиц оказывает очень существенное влияние на определяемые оптические характеристики облачных слоев. Однако в работах, где применялся метод А. В. Мороженко, при модельных расчетах рассматривались полидисперсные среды, заполненные частицами сферической формы. Основными причинами этого являются отсутствие достоверной информации о форме облачных частиц и их распределении с высотой в атмосферах планет-гигантов, а также относительная простота определения оптических параметров сред, заполненных частицами сферической формы и наличие разработанных программных кодов для таких расчетов (см., например, [26]). Также следует подчеркнуть, что согласно выводам работы [40] достоверными можно считать только относительные изменения получаемых значений величины эффективной оптической глубины и производных от нее величин, а не их абсолютные значения.

Определение параметров вертикальной структуры облачного слоя методом А. В. Мороженко сводится к выполнению следующей последовательности операций.

1. Задание модели облачных частиц (действительная часть показателя преломления и параметры функции распределения частиц по размерам, полученные в работах по анализу поляриметрических данных) и расчет коэффициентов разложения  $x_i^a$  индикатрисы рассеяния по

полиномам Лежандра и объемных коэффициентов рассеяния  $\sigma_0(\lambda)$  полидисперсной среды в исследуемом спектральном интервале.

2. Определение значений альbedo однократного рассеяния  $\omega$  в точке исследуемого контура спектральной полосы поглощения метана путем сравнения данных измерений величины отражательной способности детали с соответствующими значениями из интерполяционного массива, рассчитанного для модели полубесконечной однородной газовой-аэрозольной среды при полученных выше значениях коэффициентов  $x_i^a$  в диапазоне физически допустимых значений величины  $\lambda$ .

3. Вычисление начальных значений  $\omega_{\text{эф}}^s$  с использованием полученных в предыдущем пункте значений  $\omega_{\text{эф}}$ , а по ним — величины рассеивательной

$$\omega_{\text{эф}}^s = \omega_{\text{эф}} \quad (1)$$

и поглощательной

$$\omega_{\text{эф}} = \omega_{\text{эф}} (1 - \omega_{\text{эф}}) \quad (2)$$

составляющих эффективной оптической глубины (индексы  $s$  и  $v$  обозначают аэрозольное поглощение в непрерывном спектре и молекулярное поглощение газа).

4. После учета поглощения в непрерывном спектре (либо пренебрежения им в случае его малости по сравнению с молекулярным поглощением в данной спектральной точке) с использованием  $\omega_{\text{эф}}^v$  рассчитывается количество метана (в км-амагат) на луче зрения:

$$NL = \frac{\omega_{\text{эф}}^v}{k}, \quad (3)$$

где  $k$  — объемные монохроматические коэффициенты поглощения метана, значения которых зависят как от длины волны, так и от физических условий в атмосфере, в которых находится слой поглощающего газа.

5. По значениям  $NL$  в модели заданного химического состава атмосферы Юпитера и величины относительной концентрации метана рассчитываются значения газовой рассеивательной составляющей эффективной оптической глубины слоя:

$$\omega_{\text{эф}}^g(\lambda) = (NL / \omega_{\text{эф}}^v) g(\lambda), \quad (4)$$

где  $g(\lambda)$  — спектральные значения объемных коэффициентов молекулярного рассеяния среды

6. Вычисляется параметр относительного вклада молекулярного рассеяния:

$$\omega(\lambda) = \omega_{\text{эф}}^g(\lambda) / \omega_{\text{эф}}^s(\lambda). \quad (5)$$

7. Рассчитываются значения коэффициентов  $x_i^c$  газовой-аэрозольной среды с учетом поправки на молекулярное рассеяние:

$$x_i^c = (1 - x_i^a) x_i^g. \quad (6)$$

8. С использованием уточненных коэффициентов  $x_i^c$  рассчитывается модельная величина отражательной способности и затем, в несколько циклов, выполняется пошаговый подбор значения величины до совпадения рассчитанной и измеренной отражательной способности детали.

9. Этапы вычислений 3—8 повторяются до тех пор, пока текущее рассчитанное значение отражательной способности отличается от результата расчета в предыдущей итерации не более чем на величину заданной точности вычислений. Полученные в последней итерации значения параметров газовой-аэрозольной среды используются в дальнейших расчетах.

10. В исследуемой точке контура полосы поглощения рассчитываются значения аэрозольной рассеивательной составляющей оптической глубины:

$$a_{\text{эф}} = s_{\text{эф}} - g_{\text{эф}} \quad (7)$$

и значение давления  $P$ , при котором находится слой газа, формирующий поле рассеянного света в исследуемой точке полосы поглощения. Значения величин  $a_{\text{эф}}$  и  $g_{\text{эф}}$  приводятся к единой длине волны [31].

11. Этапы 2—10 последовательно выполняются для всех точек в полосах поглощения обрабатываемых исходных данных.

12. Строятся графические зависимости от количества газа  $NL$  (или давления  $P$ ) рассчитанных величин  $a_{\text{эф}}$  и  $a_{\text{эф}}/g_{\text{эф}}$  и выполняется их анализ.

Применение метода А. В. Мороженко к спектрофотометрическим измерениям отдельных деталей диска Юпитера [6, 9, 17], а также наблюдениям места падения фрагмента кометы Шумейкер — Леви 9 и невозмущенных окрестностей [28], позволило выявить различие вертикальной структуры у облачных слоев на этих участках.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

В работе анализируются данные о контурах полос поглощения метана с центрами на  $\lambda = 619$  и  $727$  нм, полученные для ряда широтных поясов Юпитера.

Спектрофотометрические наблюдения выполнены 21—22 ноября 2013 г. сотрудниками лаборатории физики Луны и планет Астрофизического института им. В. Г. Фесенкова (Алматы, Казахстан). Наблюдения проводились на 60-см телескопе РЦ-600 в 7.5-м касегреновском фокусе с помощью дифракционного спектрографа SGS (CCD-камера ST-7XE, дисперсия 0.43 нм/пкл, разрешение 0.8 нм, масштаб изображения на спектрограмме 4/11).

Зональные спектры регистрировались при последовательном сканировании диска Юпитера. В качестве опорного объекта для спектро-

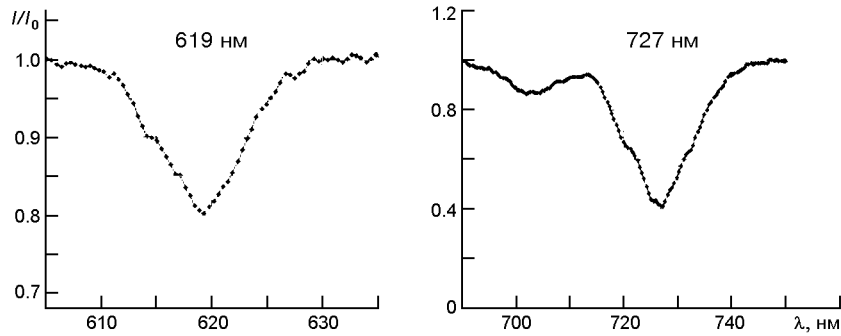


Рис. 1. Профили полос поглощения метана в значениях остаточных интенсивностей (по отношению к уровню непрерывного спектра) для EZ Юпитера в полосах  $\lambda = 727$  и  $619$  нм

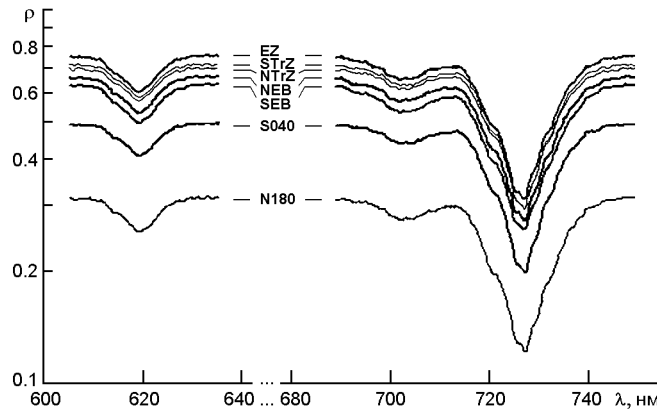


Рис. 2. Профили полос поглощения метана в единицах отражательной способности (логарифмическая шкала) для исследованных широтных деталей диска Юпитера

фотометрической привязки наблюдался Ганимед. Измерения зональных спектрограмм выполнялось путем усреднения 27 пиксельных строк на оси спектрограммы, что соответствовало положению на центральном меридиане. Позиционная привязка спектрограмм, входивших в скан, осуществлялась путем сравнения по относительной интенсивности с профилями спектрограмм центрального меридиана Юпитера, для которых можно рассчитать шкалу планетографических широт.

На рис. 1 показан пример полученных профилей полос поглощения метана в EZ Юпитера. Профили построены в значениях остаточных интенсивностей (по отношению к уровню непрерывного спектра).

На рис. 2 показаны профили полос в единицах видимого альбедо в соответствующих зонах. Коэффициент яркости для экваториальной зоны принят равным 0.75, что наилучшим образом согласуется с известными оценками отражательной способности центра диска Юпитера в оранжево-красной области спектра.



**ПРОГРАММНЫЕ КОДЫ,  
ИСХОДНЫЕ ПРЕДПОЛОЖЕНИЯ  
И МОДЕЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ**

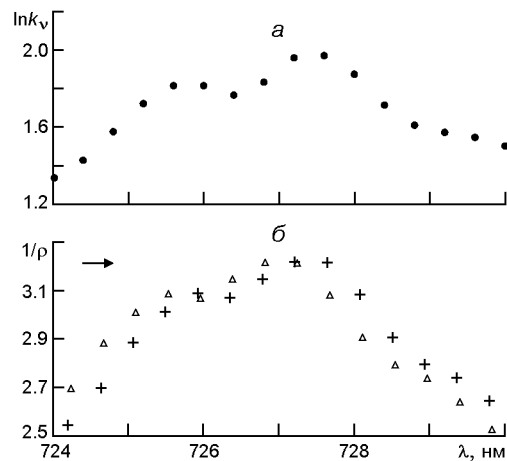
Модельные расчеты выполнены с помощью комплекса компьютерных программных кодов, реализующего автоматизированное применение метода А. В. Мороженко определения характеристик вертикальной структуры аэрозольных слоев атмосфер планет-гигантов. Для вычисления оптических параметров моделируемой полидисперсной среды применены программные коды, разработанные М. И. Мищенко [26]. Детальное описание комплекса, исходные предположения и использованные нами при модельных расчетах значения параметров атмосферы Юпитера приведены в работах [31—33].

**ОСОБЕННОСТИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ  
ПОДГОТОВКИ ДАННЫХ**

Как и в работах [32, 33], при анализе использовались значения  $k$ , которые были получены в [27] путем пересчета значений, полученных при комнатной температуре [21], с использованием спектрофотометрических данных для интегрального диска планеты [23]. Поскольку оказалось, что длины волн значений  $k$  и отражательной способности в полосах поглощения не совпадают, то путем соответствующего смещения значений по оси было проведено согласования центров контуров  $k$  и для всех исследованных широтных областей Юпитера.

На рис. 3 приведен пример выполнения такой коррекции исходных данных для детали EZ Юпитера в окрестностях ядра полосы поглощения метана с центром на  $\lambda = 727.6$  нм.

Рис. 3: а вид спектральной зависимости величин монохроматических коэффициентов поглощения метана  $\ln k$  в окрестности ядра полосы  $\lambda = 727$  нм; б коррекция систематического смещения по длине волны измеренных в EZ Юпитера значений контура  $1/\rho$  (треугольники) до его совмещения (крестики) с контуром значений коэффициентов  $\ln k$ , стрелка указывает направление и величину выполненной спектральной коррекции



**РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА**

Результаты обработки данных спектральных измерений отражательной способности широтных деталей диска Юпитера приведены в таблице и показаны на рис. 4—11. Оказалось, что для всех деталей диска Юпитера характер зависимостей  $\tau_{эф}^a$  и  $\tau_{эф}^a / \tau_{эф}^{aEZ}$  от величины давления (т. е. от глубины расположения в атмосфере планеты исследуемого слоя) практически идентичен, однако наблюдаются и различия.

Эффективные уровни формирования излучения в полосах  $\lambda = 727$  и 619 нм у широтных деталей диска планеты располагаются на различных глубинах. Например, ядро полосы поглощения метана  $\lambda = 727$  нм в NEB и SEB формируется при давлениях, превышающих на

**Различие в уровнях формирования и в характеристиках облачного слоя деталей диска Юпитера в ядрах полос поглощения метана  $\lambda = 727$  и 619 нм**

Деталь	$\lambda$ , нм	$P$ , бар	$\ln(\tau_{эф}^a)$	$\ln(\tau_{эф}^a / \tau_{эф}^{aEZ})$
EZ	727.6	0.421	1.700	7.050
	619.2	1.707	2.317	6.268
NEB	727.6	0.475	1.578	6.807
	619.2	2.039	2.129	5.902
SEB	727.6	0.490	1.541	6.739
	619.2	2.178	2.057	5.763
NTrZ	727.6	0.430	1.667	6.995
	619.2	1.686	2.322	6.285
STrZ	727.6	0.428	1.665	6.997
	619.2	1.563	2.398	6.436
NTB	727.6	1.226	0.025	4.306
	619.2	4.545	0.264	3.235
STB	727.6	0.620	1.050	6.014
	619.2	2.518	1.823	5.384

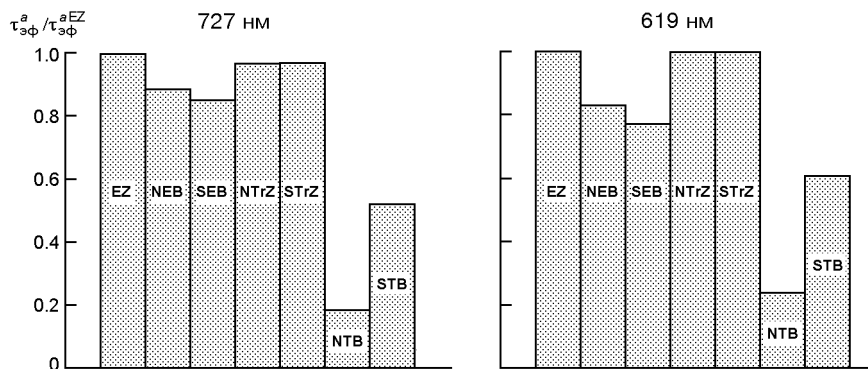


Рис. 4. Отношение величин аэрозольных рассеивательных составляющих  $\tau_{эф}^a$  деталей диска Юпитера к аэрозольной рассеивательной составляющей  $\tau_{эф}^{aEZ}$  EZ в ядрах полос  $\lambda = 727$  нм, б  $\lambda = 619$  нм

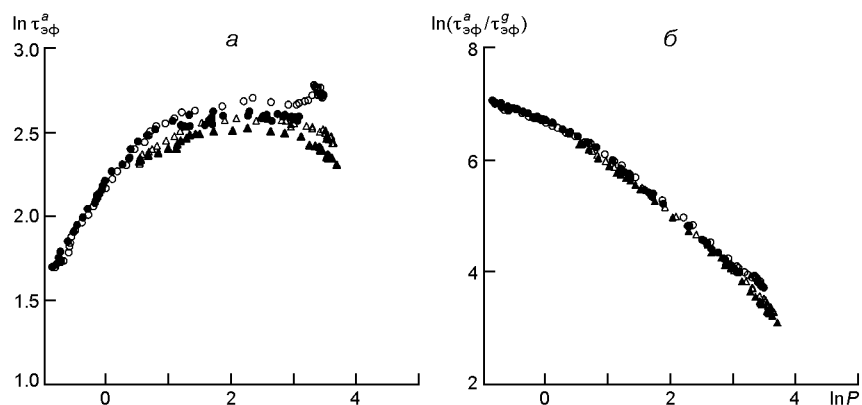


Рис. 5. Зависимости от давления аэрозольной рассеивательной составляющей эффективной оптической глубины (а) и относительной концентрации аэрозоля (б) в полосах поглощения метана  $\lambda = 727$  нм (светлые кружки и точки) и  $\lambda = 619$  нм (треугольники) для EZ Юпитера. Темные значки — для коротковолновых крыльев полос поглощения, светлые — для длинноволновых крыльев

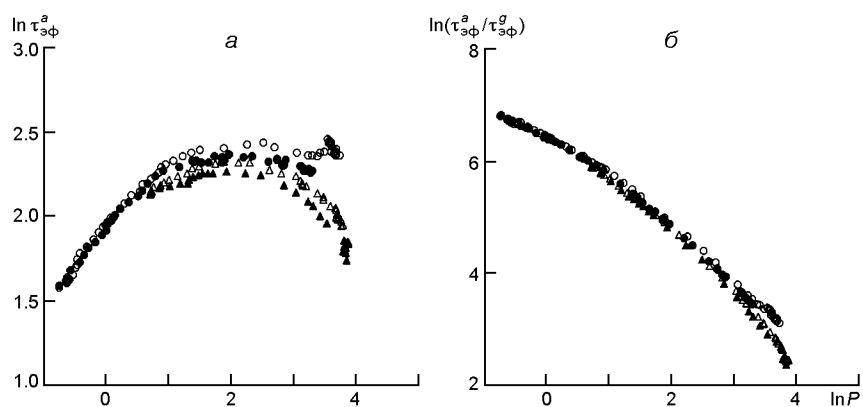


Рис. 6. То же, что и на рис. 5, для NEB

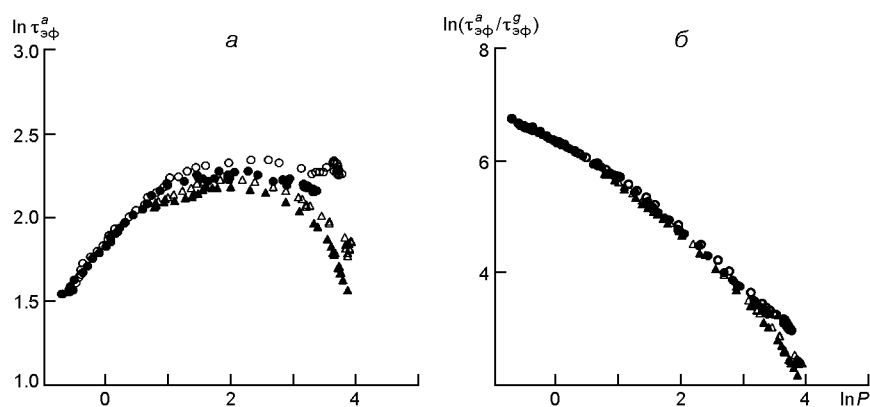


Рис. 7. То же, что и на рис. 5, для SEB

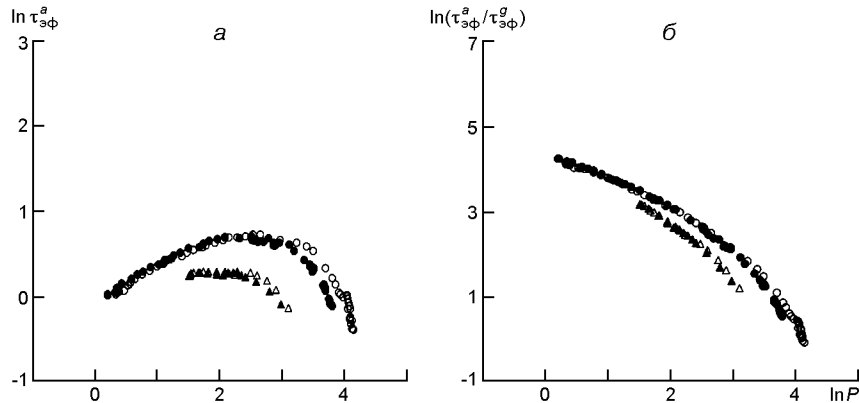


Рис. 8. То же, что и на рис. 5, для NTB

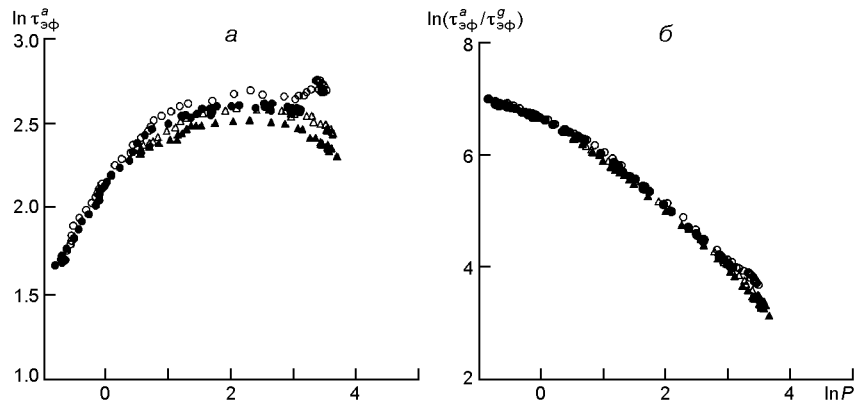


Рис. 9. То же, что и на рис. 5, для STB

0.054 и 0.069 бар давление в зоне EZ, а в деталях NTB и STB — давление больше, чем в EZ, уже на 0.805 и 0.199 бар соответственно. Давление на уровнях формирования ядра этой полосы в зонах NTrZ и STrZ больше, чем у EZ, на 0.009 и 0.007 бар.

В полосе  $\lambda = 619$  нм наблюдается похожее распределение, но с более глубоким расположением слоев относительно EZ. Исключением здесь являются зоны NTrZ и STrZ, у которых ядро полосы сформировано при меньших величинах давлениях, чем у EZ (на 0.021 и 0.143 бар соответственно).

Отношение значений  $\tau_{эф}^a$  аэрозольных рассеивательных составляющих деталей диска Юпитера к значению  $\tau_{эф}^{aEZ}$  аэрозольной рассеивательной составляющей экваториальной зоны EZ в ядрах полос  $\lambda = 727$  и 619 нм приведены на рис. 4. В полосе  $\lambda = 727$  нм (рис. 4, а) это отношение в зонах NTrZ и STrZ почти равно единице, в поясах NEB, SEB оно меньше на 10—12 %, а в деталях NTB и STB — гораздо меньше (примерно на 80 % и 50 % соответственно). В полосе  $\lambda = 619$  нм получены аналогичные характеристики (рис. 4, б).

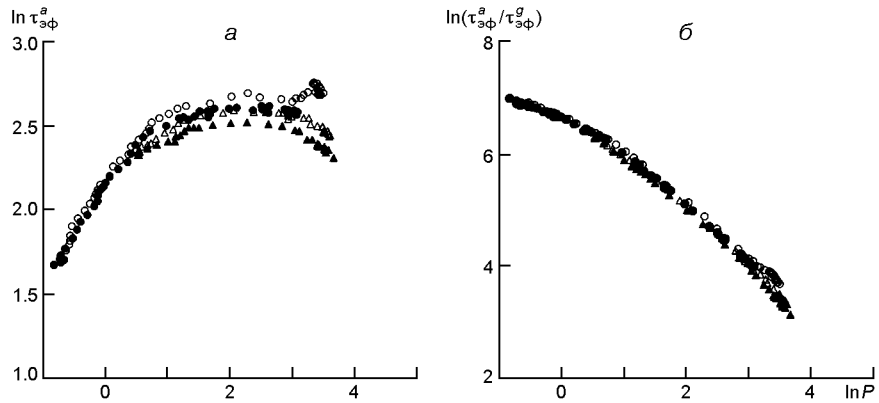


Рис. 10. То же, что и на рис. 5, для NTTrZ

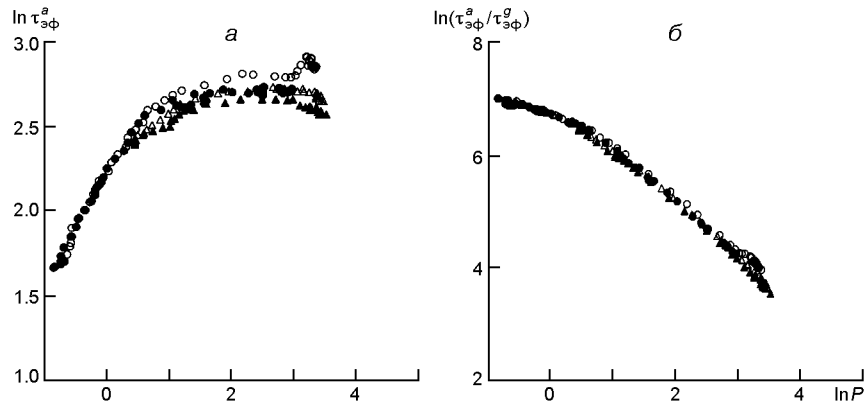


Рис. 11. То же, что и на рис. 5, для STTrZ

На рис. 5—11 приведены зависимости от давления аэрозольной рассеивательной составляющей эффективной оптической глубины (а) и относительной концентрации аэрозоля (б) в полосах поглощения метана  $\lambda = 727$  и  $619$  нм для семи поясов Юпитера. Как видно, среди исследованных деталей выделяются северный и южный температурные пояса NTB и STB (рис. 8, 9). В частности, пояс NTB (рис. 8, а) показал не только наименьшие значения величины аэрозольной рассеивательной составляющей, но и наиболее слабое ее изменение с глубиной. При этом слои атмосферы, формирующие ядра исследованных полос поглощения, располагаются здесь гораздо глубже, чем для всех других широтных поясов: ядро полосы  $\lambda = 727$  нм — на уровне давления 1.23 бар, а полосы  $\lambda = 619$  нм — на уровне 4.55 бар.

В поясе STB аэрозольная составляющая существенно больше по абсолютной величине, чем в NTB, и показывает выраженную высотную зависимость. Давление в слое, формирующем ядро полосы  $\lambda = 727$  нм, составило 0.62 бар, а полосы  $\lambda = 619$  нм — 2.52 бар, что почти вдвое меньше, чем у NTB.

Как следует из рис. 5, б — рис. 11, б, относительная концентрация частиц аэрозоля по отношению к концентрации молекул поглощающего газа (величина  $\ln(\frac{a}{\varepsilon_{\text{эф}}}/\frac{g}{\varepsilon_{\text{эф}}})$ ) в зонах значительно больше, чем в поясах. Как и аэрозольная рассеивательная составляющая, эта величина имеет наименьшие абсолютные значения и слабо изменяется с глубиной у детали NTB.

## ВЫВОДЫ

— Графические зависимости величины относительной концентрации аэрозоля  $\ln(\frac{a}{\varepsilon_{\text{эф}}}/\frac{g}{\varepsilon_{\text{эф}}})$  от давления для всех исследованных деталей однозначно указывают на ее уменьшение с глубиной (при условии независимости объемного коэффициента рассеяния от глубины). Таким образом, максимальное сгущение облака находится при меньших значениях давления, т. е. в более высоких слоях атмосферы. Для выявления высотного положения этого сгущения необходимо выполнить обработку спектрофотометрических данных в полосах  $\lambda = 864$  и  $887$  нм. Тогда по соответствующим спектрограммам можно определить высотное положение и протяженность одного, а возможно и нескольких максимумов плотности аэрозольных слоев [17], рассчитать зависимость от давления объемного коэффициента рассеяния аэрозоля и сравнить эти характеристики для широтных зон Юпитера.

— Как следует из таблицы, верхние границы облачных слоев в более темных поясах, вероятнее всего, находятся ниже, чем в светлых зонах.

— Согласно рис. 5, б — рис. 11, б на исследованных уровнях давления величины  $\ln(\frac{a}{\varepsilon_{\text{эф}}}/\frac{g}{\varepsilon_{\text{эф}}})$  в светлых зонах больше, чем в поясах. У расположенных симметрично относительно экватора планеты зон и поясов также наблюдаются различия. Тогда, в принятой нами модели одинаковых значений действительной части показателя преломления и параметров функции распределения аэрозольных частиц по размерам, это свидетельствует о зональных различиях величины относительной концентрации аэрозоля. Особенно велико это различие с EZ у поясов NTB и STB.

— Зависимости  $\ln(\frac{a}{\varepsilon_{\text{эф}}})$  для полос  $\lambda = 727$  и  $619$  нм не совмещаются при одинаковых уровнях давления (см. рис. 5, а — рис. 11, а). Кроме того, с определенных уровней наблюдается увеличивающееся с глубиной расхождение коротко- и длинноволновых крыльев полосы  $\lambda = 727$  нм. В зонах EZ, NTrZ и STrZ это уровни давления около 3.0, 2.0 и 3.0 бар, а в поясах NEB, SEB, NTB и STB — 2.4, 2.6, 12.0 и 5.0 бар соответственно. Согласно выводам работы [6] указанные особенности могут быть вызваны изменением на этих глубинах линейного размера аэрозольных частиц, а возможно, и их природы [39].

— Используемая нами методика анализа позволяет выявить изменения величин аэрозольной и газовой рассеивательных составляющих

эффективной оптической глубины атмосферы по изменению усредненного на луче зрения количества поглощающего газа. Таким образом, анализируется суммарный вклад участка атмосферы от ее внешнего края до уровня, где располагается слой газа, сформировавший исследуемую точку в полосе поглощения. Поскольку изученные в данной работе полосы  $\lambda = 619$  и  $727$  нм сформировались слоями газа, находящимися гораздо глубже высотного уровня расположения надоблачной дымки, выделить отдельно вклад последней не представляется возможным. С другой стороны, вкладом дымки в абсолютные значения величин рассеивательных составляющих оптической глубины исследуемых слоев в используемой методике пренебрегается, так как анализируются их относительные изменения с глубиной.

— В глубоких слоях атмосферы у всех деталей диска планеты, кроме NTB, на зависимостях длинноволнового крыла полосы  $\lambda = 727$  нм наблюдается увеличение значений  $\ln(\frac{a}{\epsilon_{\text{эф}}})$  и  $\ln(\frac{a}{\epsilon_{\text{эф}}} / \frac{g}{\epsilon_{\text{эф}}})$ , что может быть обусловлено наличием облачного слоя либо значительным уменьшением поглощения в непрерывном спектре. Возможно, для выяснения реальной причины этого скачка необходимо будет использовать независимые наблюдательные данные.

— На зависимостях  $\ln(\frac{a}{\epsilon_{\text{эф}}})$  (см. рис. 5, а — рис. 11, а), начиная с определенных величин давления, наблюдается недостоверное уменьшение значений, что может быть объяснено завышенными значениями газовой рассеивательной составляющей  $\frac{g}{\epsilon_{\text{эф}}}$  эффективной оптической глубины, которое по нашему мнению обуславливается пренебрежением при расчетах поглощением в непрерывном спектре. Вследствие этого нами при расчетах были получены завышенные количества метана  $NL$ , а значит и рассчитываемых значений  $\frac{g}{\epsilon_{\text{эф}}}$ .

Авторы искренне благодарят А. В. Мороженко за советы и замечания, данные в процессе выполнения расчетов и при обсуждении рукописи. Авторы выражают признательность рецензенту за полезные замечания, учет которых улучшил и расширил реферативную часть работы.

1. Аврамчук В. В., Бугаенко Л. А., Мороженко А. В., Яновицкий Э. Г. Результаты исследований Юпитера, выполненные в Главной астрономической обсерватории АН УССР // Астрометрия и астрофизика.—1977.—Вып. 31.— С. 54—68.
2. Вдовиченко В. Д. Спектрофотометрия Юпитера в  $\lambda$  0.6—1.1 мкм: Широтные изменения оптических параметров атмосферы Юпитера // Астрон. журн.—1979.— **56**, № 3.—С. 606—612.
3. Кучеров В. А., Мищенко М. И., Мороженко А. В. Спектрополяриметрия в полосах поглощения и вертикальная структура планетных атмосфер // Письма в Астрон. журн.— 1990.—**14**, № 9.—С. 835—839.
4. Мороженко А. В. Результаты поляризационных исследований Юпитера // Астрометрия и астрофизика.—1976.—Вып. 30.—С. 47—54.
5. Мороженко А. В. О структуре облачного слоя Юпитера // Письма в Астрон. журн.—1984.—**10**, № 10.—С. 775—779.

6. *Мороженко А. В.* Вертикальная структура широтных облачных поясов Юпитера // Астрон. вестник.—1985.—**19**, № 1.—С. 64—76.
7. *Мороженко А. В.* Зоны и полосы диска Юпитера. Надоблачный слой // Астрон. вестник.—1990.—**24**, № 3.—С. 211—220.
8. *Мороженко А. В.* Проблемы изучения вертикальных структур облачных слоев атмосфер планет-гигантов // Кинематика и физика небес. тел.—1993.—**9**, № 6.—С. 3—26.
9. *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.
10. *Мороженко А. В.* Результаты спектрополяриметрических наблюдений планет и галилеевых спутников Юпитера в противостояния 1986, 1988 и 1989 гг. // Кинематика и физика небес. тел.—2001.—**17**, № 1.—С. 45—57.
11. *Мороженко О. В.* Методи і результати дистанційного зондування планетних атмосфер. — Київ: Наук. думка, 2004.—648 с.
12. *Соболев В. В.* Исследование атмосферы Венеры. II // Астрон. журн.—1968.—**45**, № 1.—С. 169—176.
13. *Тейфель В. Г.* Об изменении с широтой высоты верхней границы облачного покрова Юпитера // Письма в Астрон. журн.—1975.—**1**, № 10.—С. 34—40.
14. *Яновицкий Э. Г.* Эффективная оптическая толщина облачного слоя атмосферы, в котором формируется наблюдаемый спектр планеты. Концепция и элементарные оценки // Кинематика и физика небес. тел.—1997.—**13**, № 6.—С. 18—25.
15. *Chamberlain J. W.* The atmosphere of Venus near cloud top // *Astrophys. J.*—1965.—**141**, N 4.—P. 1184—1205.
16. *Coffeen D. L.* Optical polarization measurements of the Jupiter atmosphere at 1030 phase angle // *J. Geophys. Res.*—1974.—**79**, N 25.—P. 3645—3660.
17. *Dementiev M. S., Morozhenko A. V.* Zones and belts of Jupiter's disk. The difference in the vertical structure of cloud layers // *Solar Syst. Res.*—1990.—**24**, N 4.—P. 275—287.
18. *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 // *Solar Syst. Res.*— 2005.—**32**.—P. 102—111.
19. *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.
20. *Gierash P. J., Conrath B. J., Magalhaes J. A.* Zonal mean properties of Jupiter's upper troposphere from Voyager infrared observations // *Icarus.*—1986.—**67**, N 3.—P. 456—483.
21. *Giver L. P.* Intensity measurements of the CH<sub>4</sub> bands in the region of 4350 to 10600 Å // *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transpher.*—1978.—**19**, N 2.—P.311—322.
22. *Hansen J. E.* Circular polarization of sunlight reflected by clouds // *J. Atmos. Sci.*—1971.—**28**, N 5.—P. 6—12.
23. *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.
24. *Kawata Y., Hansen J. E.* Circular polarization of sunlight reflected by Jupiter // *Jupiter.* — Tucson, Arizona, 1976.—P. 516—530.
25. *Mishchenko M. I.* Physical properties of the upper tropospheric aerosols in the equatorial region of Jupiter // *Icarus.*—1990.—**84**, N 2.—P. 296—304.



26. *Mishchenko M. I.* The FORTRAN code for computing the scattering of an ensemble of polydisperse, homogeneous spherical particles is based on the Lorenz-Mie theory.—<http://www.giss.nasa.gov/staff/mmishchenko/ftpcode/spher.f>.
27. *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 Phys. Celest. Bodies.*—2007.—**23**, N 6.—P. 245—257.
28. *Morozhenko A. V., Ovsak A. S., Korsun P. P.* The vertical structure of Jupiter's cloud layer before and after the impact of comet Shoemaker-Levy 9 // *European SL-9/Jupiter Workshop.*—1995—P. 267.
29. *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.
30. *Ovsak A. S.* Calculation of effective optical depth of absorption line formation in homogeneous semi-infinite planetary atmosphere during anisotropic scattering // *Kinematics and Phys. Celest. Bodies.*—2010.—**26**, N 2.—P. 86—88.
31. *Ovsak A. S.* Upgraded technique to analyze the vertical structure of the aerosol component of the atmospheres of giant planets // *Kinematics and Phys. Celest. Bodies.*—2013.—**29**, N 6 —P. 291—300.
32. *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.
33. *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 Phys. Celest. Bodies.*—2015.—**31**, N 1.—P. 25—32.
34. *Price M. J., Hall J. S., Boyce P. B., Albrecht R.* The physical properties of the Jovian atmosphere inferred from eclipses of the Galilean satellites. II. 1971 apparition // *Icarus.*—1972.—**17**, N 1.—P. 49—56.
35. *Rages K., Beebe R., Senske D.* Jovian stratospheric hazes: The high phase view from Galileo // *Icarus.*—1999.—**139**, N 2.—P. 211—226.
36. *Sato T., Kawabata K.* Methane band photometry of the faded south equatorial band of Jupiter // *Astrophys. J.*—1992.—**384**, N 1.—P. 298—304.
37. *Smith P. H.* The vertical structure of the Jovian atmosphere // *Icarus.*—1986.—**65**, N 2/3.—P. 264—279.
38. *Tomasko M. G., West R. A., Castillo N. D.* Photometry and polarimetry of Jupiter at large phase angles. I. Analysis of imaging data of a prominent belt and a zone from Pioneer 10 // *Icarus.*—1978.—**33**, N 3.—P. 558—592.
39. *West R. A., Baines K. H., Friedson A. J.* Jovian clouds and haze // *Jupiter. The planet, satellites and magnetosphere / Eds F. Bagenal, T. E. Dowling, W. B. McKinnon.* — Cambridge: Cambridge University Press, 2004.—Cambridge planetary science, Vol. 1.—P. 79—104.
40. *Yanovitskij E. G., Ovsak A. S.* Effective optical depth of absorption line formation in semi-infinite planetary atmospheres // *Kinematics and Phys. Celest. Bodies.*—1997.—**13**, N 4.—P. 1—19.

Статья поступила в редакцию 13.10.14