

УДК 523.45-852

А. В. Мороженко¹, А. С. Овсак¹, А. П. Видьмаченко¹,
В. Г. Тейфель², П. Г. Лысенко²

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

² Астрофизический институт им. В. Г. Фесенкова
Алматы, Казахстан, 050020
e-mail: tejff@mail.ru

Мнимая часть показателя преломления аэрозоля в широтных полосах диска Юпитера

Определены значения мнимой части показателя преломления аэрозоля n_i в светлых (EZ, NTrZ, STrZ) и темных (NTB, NEB, SEB, STB) широтных полосах диска Юпитера, усредненные по эффективной глубине формирования интенсивности диффузно отраженного планетой излучения. Они оказались в зонах меньшими, чем в поясах, и находятся соответственно в пределах: 0.00017—0.00041 и 0.00063—0.00098 на $\lambda = 605$ нм; 0.00019—0.00041 и 0.00065—0.00097 на $\lambda = 631$ нм; 0.00017—0.00041 и 0.00070—0.00112 на $\lambda = 714$ нм, 0.00019—0.00044 и 0.00069—0.00111 на $\lambda = 742$ нм. Возможно, эти результаты отображают различие вертикальной стратификации природы облачных слоев, а также и размеров аэрозольных частиц (в поясах они больше).

УЯВНА ЧАСТИНА ПОКАЗНИКА ЗАЛОМЛЕННЯ АЕРОЗОЛЮ В ШИРОТНИХ ПОЛОСАХ ДИСКУ ЮПІТЕРА, Мороженко О. В., Овсак О. С., Видьмаченко А. П., Тейфель В. Г., Лысенко П. Г. — Визначено уявну частину показника заломлення аерозолі n_i у світлих (EZ, NTrZ, STrZ) і темних (NTB, NEB, SEB, STB) широтних смугах диска Юпітера, усереднені по ефективній глибині формування інтенсивності дифузно відбитого планетою випромінювання. Вони виявилися у зонах меншими, ніж у поясах, і лежать відповідно у межах: 0.00017—0.00041 і 0.00063—0.00098 на $\lambda = 605$ нм; 0.00019—0.00041 і 0.00065—0.00097 на $\lambda = 631$ нм; 0.00017—0.00041 і 0.00070—0.00112 на $\lambda = 714$ нм, 0.00019—0.00044 і 0.00069—0.00111 на $\lambda = 742$ нм.

Можливо, ці результати відображають відмінності вертикальної стратифікації природи хмарових шарів, а також і розмірів аерозольних частинок (у поясах вони більші).

THE IMAGINARY PART OF THE REFRACTIVE INDEX OF AEROSOL IN LATITUDINAL BELTS OF JUPITER'S DISC, by Morozhenko A. V., Ovsak A. S., Vid'machenko A. P., Teifel V. G., Lysenko P. G. — The values of an imaginary part of the refractive index of the aerosol n_i was determined in light (EZ, NTrZ, STrZ) and dark (NTB, NEB, SEB, STB) latitudinal belts of Jupiter's disc. Those values were averaging over the effective depth of the formation of the intensity of diffusely reflected radiation planet. They were smaller in the zones than in the belts and there are: 0.00017—0.00041 and 0.00063—0.00098 on the $\lambda = 605$ nm; 0.00019—0.00041 and 0.00065—0.00097 on the $\lambda = 631$ nm; 0.00017—0.00041 and 0.00070—0.00112 on the $\lambda = 714$ nm, 0.00019—0.00044 and 0.00069—0.00111 on the $\lambda = 742$ nm, respectively. Perhaps these results are reflecting the difference in the vertical stratification of the nature of cloud layers, as well as the sizes of aerosol particles (in zones they are larger).

ВВЕДЕНИЕ

Относительно причин наличия цветовой гаммы у диска Юпитера есть ряд гипотез [15, 26, 37, 38, 40, 42, 43], основной идеей которых является образование сложных газовых, а значит и конденсатных соединений в температурных условиях атмосферы планеты, что подтверждается термодинамическим моделированием процессов формирования облаков в атмосферах планет-гигантов [26, 41]. Образующиеся при этом частицы различной природы должны иметь разные значения действительной (n_r) и мнимой (n_i) частей комплексного показателя преломления. Поэтому важной задачей физики атмосферы Юпитера является определение этих характеристик в его широтных поясах. До настоящего времени такие оценки проводились лишь на основе анализа данных спектрополяриметрических наблюдений и относились, как правило, к аэрозолю в экваториальном поясе диска планеты [4, 11, 19, 20, 28, 32]. При этом значения величины n_r получались из анализа одних и тех же данных о степени линейной поляризации света, но с различной строгостью учета многократного рассеяния и различных предположениях о форме частиц. Оказалось, что анализ, выполненный в модели сферических частиц с приближенным [4, 32] и с точным [28] учетом многократного рассеяния, дал практически одинаковые значения не только величины n_r , но и параметров функции распределения частиц по размерам: $n_r = 1.36 \pm 0.01$, средний геометрический радиус частиц $r_0 = 0.19 \pm 0.01$ мкм, дисперсия размеров $\sigma^2 = 0.28$

0.02 мкм (для нормально-логарифмического закона распределения

частиц по размерам [4, 32]) и $n_r = 1.38 \pm 0.01$, эффективный радиус частиц $r_{\text{эф}} = 0.38 \pm 0.09$ мкм и дисперсия размеров $v_{\text{эф}} = 0.35$ (для модифицированного гамма-распределения частиц по размерам [28]). Отметим, что перерасчет приведенных выше параметров нормально-логарифмического закона на модифицированное гамма-распределение дает величины $r_{\text{эф}} = 0.40$ мкм и $v_{\text{эф}} = 0.35$, практически совпадающие с результатами работы [28]. В то же время анализ [19, 20], выполненный в рамках моделей хаотически ориентированных сплюснутых и вытянутых сфероидов, а также цилиндров, показал, что оцениваемые параметры аэрозоля весьма чувствительны к выбранной форме частиц, а значение $n_r > 1.4$.

Особое место занимает работа [25], в которой было показано, что рассчитанные по степени линейной поляризации параметры аэрозоля из работы [32] не совпадают с их оценками по наблюдениям круговой поляризации в полярных районах планеты, а действительная часть показателя преломления также достигает существенно больших значений. Однако такое противоречие может быть кажущимся, так как возможно, что оно отображает реальные изменения параметров аэрозоля не только по диску планеты, но и с глубиной в ее атмосфере (см. [12], с. 458). Ведь характер спектральной и фазовой зависимости линейной поляризации в центре диска формируется главным образом одно- и двукратным рассеянием света в верхних слоях атмосферы, а круговой поляризации в приполярных районах — многократным рассеянием во всей толще атмосферы [22]. Такое объяснение подтверждается результатами анализа данных спектрофотометрических измерений в месте падения одного из фрагментов кометы Шумейкер — Леви 9 в [31], а также данными выполненного на зонде КА «Галилео» [33] нефелометрического эксперимента. В первом случае для аэрозоля, поднятого взрывом фрагмента кометы в верхние слои атмосферы, были получены результаты, согласно которым радиус частиц должен превышать значение, полученное в работах [4] и [32]. Во втором было выявлено изменение не только размера облачных частиц, но и величины n_r с глубиной. Здесь мы считаем необходимым отметить, что оценки величины n_r , полученные в [4, 28, 32], не противоречат высказанному еще в середине 20 ст. предположению об аммиачной природе верхнего облачного слоя Юпитера [3], для которого на длине волны линии D натрия $n_r = 1.355$ в жидкой фазе и 1.415 — в твердой.

Значения мнимой части показателя преломления $n_i(\lambda)$ оценивались как по геометрическому альбедо [11], так и по отражательной способности в центре диска Юпитера [19, 20, 28] и показали оригинальную спектральную зависимость: постепенное уменьшение n_i с увеличением длины волны в коротковолновой области спектра сменялось ее увеличением в длинноволновой области. Так, например, в работе [20] на длинах волн $\lambda = 423, 600$ и 798 нм были получены значения соответственно $n_i = 0.0012, 0.0006, 0.0025$ для сфер и $0.0017, 0.0008, 0.0036$ — для сфероидов со сплюснутостью 1.5. По нашему

мнению, такая зависимость является ошибочной из-за неучета поглощательной составляющей аэрозоля и отображает проблему разделения вкладов аэрозольной и газовой составляющих в суммарное поглощение света атмосферой. Дело в том, что в коротковолновой области видимого спектра ($\lambda < 600$ нм), где полосы поглощения метана довольно слабые [21, 23, 24], имеются интервалы длин волн с чисто аэрозольным поглощением, которое можно выделить. В то же время в длинноволновой области ($\lambda > 600$ нм) полосы поглощения метана в спектрах планет-гигантов практически непрерывны, поэтому в работах [11, 19, 20, 28] аэрозольной поглощательной составляющей приписывалось поглощение метаном в перекрывающихся крыльях полос поглощения. Безусловно, авторы работ это понимали, но не имели возможности разделить составляющие. В работе [10] такой метод был разработан и протестирован при обработке данных об отражательной способности Северного Экваториального Пояса (NEB) Юпитера из работы [14]. С учетом поглощения в непрерывном спектре была получена более достоверная спектральная зависимость величины $n_i(\lambda)$. Целью настоящей работы является определение по наблюдательным данным из работы [14] зависимости $n_i(\lambda)$ для ряда широтных полос диска Юпитера. Экспериментальная часть работы выполнена в Астрофизическом институте им. В. Г. Фесенкова (Алматы, Казахстан), а компьютерные расчеты и анализ результатов — в Главной астрономической обсерватории НАН Украины (Киев, Украина).

ИСХОДНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ И ВЫБОР МОДЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Согласно применяемому методу анализа при расчетах для каждой спектральной точки рассматривается своя оптически однородная газозо-аэрозольная среда, имеющая полубесконечную оптическую толщину. Ниже кратко рассмотрим проблему выбора модели аэрозольных частиц для такой среды.

В физических условиях верхних слоев атмосферы Юпитера аммиак может находиться как в жидком, так и в твердом агрегатном состоянии [39]. При этом действительная часть его показателя преломления находится в диапазоне значений от 1.35 до 1.42 (см. [12], с. 458), а образующиеся аэрозольные частицы могут иметь разнообразнейшие формы.

Моделирование рассеяния света в полидисперсных аэрозольных средах, содержащих частицы с произвольной ориентацией, имеющих форму эллипсоида вращения с переменными параметрами вытянутости-сплюснутости, показало высокую чувствительность действительной n_r и мнимой n_i частей комплексного показателя преломления, а также параметров функции распределения аэрозольных частиц по размерам к их форме [19, 20]. Расчеты для полидисперсных сред с пылеобразными частицами в произвольной ориентации также демонстри-

руют изменение формы индикатрисы рассеяния, наиболее существенное при больших фазовых углах [29]. Однако из-за отсутствия достоверных данных о природе и агрегатном состоянии аэрозольных частиц на различных высотных уровнях атмосферы Юпитера, их геометрическая форма на сегодняшний день не может быть однозначно определена.

С другой стороны, лабораторные исследования рассеяния света объемом, заполненным измельченными твердыми однородными частицами произвольных размеров, форм и ориентации, имеющими острые грани (кубики, ромбы, осколки и т. п.), которые ближе всего соответствуют характеристикам реальных аэрозольных частиц в твердом агрегатном состоянии, не показали существенного проявления бокового и обратного рассеяния. То есть такие среды рассеивают свет подобно объему, заполненному сферическими частицами. Исследованиями выявлено, что альbedo однократного рассеяния сред, содержащих аэрозоль, не имеет существенной зависимости от формы частиц (см. [12], с. 63). При наземных наблюдениях Юпитера фазовый угол не превышает 12° , поэтому влияние используемой при расчетах формы частиц на результаты моделирования относительно невелико.

С учетом сказанного выше в настоящей работе применялась модель атмосферы, представляющая собой газовой-аэрозольную полидисперсную среду полубесконечной оптической толщины, аэрозольные частицы которой являются однородными сферами со значениями параметров: $n_r = 1.36$ и $r_{эф} = 0.4$ мкм, $v_{эф} = 0.35$ при модифицированном гамма-распределении частиц по размерам [28]. Значения мономатричных коэффициентов поглощения метана k взяты из работы [30], а для относительных концентраций основных газовых составляющих атмосферы принимались следующие значения: 0.0021 (метан [33]), 0.85 (водород) и 0.15 (гелий).

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МНИМОЙ ЧАСТИ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ

Определению мнимой части показателя преломления предшествует нахождение значения аэрозольной составляющей поглощения, которое базируется на методе определения параметров вертикальной структуры облачных слоев атмосфер планет-гигантов [2, 5—9, 13, 14, 18, 30, 31, 35, 36]. При разработке этого метода было использовано высказанное Чемберленом в работе [17] предположение о том, что поле солнечного излучения, которое диффузно отражается полубесконечной оптически однородной и частично поглощающей атмосферой, формируется лишь ее внешним слоем, имеющим конечную оптическую толщину $\tau_{эф}$, названную эффективной оптической глубиной. Там же впервые было записано аналитическое выражение для определения величины $\tau_{эф}$, дальнейшая модернизация и примеры применения

которого представлены в работах [1, 16, 34, 43]. Поскольку разделение аэрозольного и газового поглощения света является одной из составляющих в последовательности операций по определению параметров вертикальной структуры облачного слоя атмосферы планеты-гиганта [35, 36], ниже мы кратко опишем эту последовательность.

1. В заданной модели аэрозоля (действительная часть показателя преломления, параметры функции распределения по размерам и форма частиц) с использованием программных кодов М. Мищенко [27] рассчитываются спектральные значения коэффициентов x_i^a разложения индикатрисы рассеяния по полиномам Лежандра и объемных коэффициентов $\sigma_0(\lambda)$ рассеяния моделируемой полидисперсной среды.

2. Из сравнения наблюдаемой спектральной зависимости отражательной способности (λ, θ, μ) широтных полос Юпитера с величинами, рассчитанными в модели оптически однородной аэрозольной среды, имеющей полубесконечную оптическую толщину, и с использованием полученных в п. 1 значений коэффициентов x_i^a , определяются значения альбеда однократного рассеяния среды ω .

3. Полученные в п. 2 значения ω используются для вычисления начальных величин эффективной оптической глубины $\tau_{\text{эф}}$, а по ним — значений ее рассеивательной и поглощательной составляющих:

$$\tau_{\text{эф}}^s = \tau_{\text{эф}}^g + \tau_{\text{эф}}^a, \quad (1)$$

$$\tau_{\text{эф}}^a = \tau_{\text{эф}}^g (1 - \omega), \quad (2)$$

(индексы g и a обозначают аэрозольное поглощение в непрерывном спектре и молекулярное поглощение атмосферного газа).

4. Полагая $\tau_{\text{эф}}^a = 0$ в выражении (2), рассчитываем количество метана (в км-амагат) на луче зрения:

$$NL_{\text{эф}}^v = \tau_{\text{эф}}^g / k. \quad (3)$$

5. В модели заданного химического состава атмосферы Юпитера и величины относительной концентрации метана μ , рассчитываются значения газовой рассеивательной составляющей эффективной оптической глубины

$$\tau_{\text{эф}}^g(\lambda) = (NL_{\text{эф}}^v / \mu) g(\lambda), \quad (4)$$

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

6. Вычисляется параметр относительного вклада молекулярного рассеяния

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

7. По значениям $f(\lambda)$ уточняются значения коэффициентов x_i^c разложения по полиномам Лежандра индикатрисы рассеяния исследуемой газовой-аэрозольной среды:

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

8. С применением уточненных значений коэффициентов x_i^c операции 3—7 повторяются до тех пор, пока текущее рассчитанное значение величины $\varepsilon_{\text{эф}}$ будет отличаться от ее значения в предыдущей итерации на величину, не превышающую заданную точность вычислений.

9. Рассчитываются значения аэрозольной рассеивательной составляющей оптической толщины и атмосферного давления на исследуемом уровне атмосферы:

$$\varepsilon_{\text{эф}}^a, \varepsilon_{\text{эф}}^s, \varepsilon_{\text{эф}}^g, \quad (7)$$

$$P(\lambda) = \frac{\varepsilon_{\text{эф}}^g(\lambda)^4 R g}{24 \lambda^3 \mu^2}, \quad (8)$$

где R — универсальная газовая постоянная, μ — относительная концентрация метана, g — ускорение свободного падения, λ — удельная рефракция, μ — молекулярный вес атмосферы, k — постоянная Больцмана.

10. По рассчитанным значениям $\varepsilon_{\text{эф}}^a(\lambda, P)$ в коротко- и в длинноволновом крыльях полос поглощения строятся графические зависимости от давления P их величин, приведенных к одной длине волны. Очевидно, что пренебрежение аэрозольным поглощением в выражении (2) влечет за собой получение завышенных значений величин NL , $\varepsilon_{\text{эф}}^g(\lambda, P)$, P и соответствующего занижения значения величины $\varepsilon_{\text{эф}}^a(\lambda, P)$. Вследствие этого на расчетной зависимости $\varepsilon_{\text{эф}}^a(\lambda, P)$ после достижения некоторого давления, когда вклад аэрозольного поглощения становится существенным, вместо увеличения с глубиной значений $\varepsilon_{\text{эф}}^a(\lambda, P)$ или их неизменности при отсутствии аэрозоля в исследуемых слоях атмосферы наблюдается их уменьшение. Именно этот эффект и положен в основу метода определения аэрозольной поглощающей составляющей, предложенного в работе [10].

11. В выражении (3), переписанном к виду

$$NL = [1 - \varepsilon_{\text{эф}}^a(\lambda) - \varepsilon_{\text{эф}}^g(\lambda)] / k, \quad (9)$$

последовательно увеличиваем значение величины $\varepsilon_{\text{эф}}^a$ до тех пор, пока на длине волны λ , отвечающей наименьшему значению $\varepsilon_{\text{эф}}^a(\lambda, P)$, вновь найденная величина $\varepsilon_{\text{эф}}^a(\lambda, P)$ сравняется с наибольшим значением в исследуемом крыле полосы поглощения.

12. Так как в модели оптически однородного облачного слоя величина альbedo однократного рассеяния аэрозоля α_a не изменяется с глубиной, то, пренебрегая ее спектральной зависимостью внутри каждого из крыльев полосы поглощения, можно по отдельности для коротко- и длинноволнового крыльев полосы поглощения рассчитать аэрозольную поглощательную составляющую в соответствии с выражением:

$$\varepsilon_{\text{эф}}^a(\lambda_i) = [\varepsilon_{\text{эф}}^a(\lambda) / \varepsilon_{\text{эф}}^a(\lambda)] \varepsilon_{\text{эф}}^a(\lambda_i), \quad (10)$$

где значения $\varepsilon_{\text{эф}}^a(\lambda_i)$ берутся из расчетов в предыдущей итерации.

13. Все операции по уточнению NL , начиная с п. 4, повторяются до тех пор, пока не будет минимизирован эффект уменьшения значений величин $\alpha_{\text{эф}}^a(\lambda, P)$ с увеличением давления. Полученные данные позволяют рассчитать значение альbedo аэрозольных частиц:

$$\alpha_a(\lambda) = \alpha_{\text{эф}}^a(\lambda) / [\alpha_{\text{эф}}(\lambda) - \alpha_{\text{эф}}^a(\lambda)], \quad (11)$$

а его сравнение с величинами $\alpha_a^{\text{mod}}(\lambda)$, рассчитанными с помощью программных кодов М. Мищенко [27] по теории Лоренца — Ми для принятой в п. 1 модели частиц и при различных значениях мнимой части показателя преломления n_i , дает возможность подобрать значение последней.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Полученные оценки спектральных значений величин $P(\lambda)$, $\alpha_a(\lambda)$ (приведенных к $\lambda = 887.2$ нм), $\alpha_a(\lambda)$ и $n_i(\lambda)$ представлены в таблице, из которой следует, что в зонах величина n_i имеет существенно меньшие значения, чем в темных поясах (см. рис. 1). Также имеет место и различие среди однотипных участков — среди зон n_i значительно меньшие в STrZ, а среди поясов — значительно большие в STB, что может отображать различие как природы аэрозоля, так и размеров его частиц (см. результаты расчетов в таблице для удвоенного значения радиуса частиц в NEB на $\lambda = 742$ нм, отмеченные звездочкой).

В пользу этого вывода говорит следующее. Несмотря на то что интенсивность отраженного излучения зон в центре полосы поглощения на 727 нм формируется в более высоких слоях атмосферы (т. е. при меньших значениях давления P), оценки величины α_a дают там большие значения, чем в поясах. Таким образом, вклад предсказанного в [41] аммиачного слоя в поясах меньше, чем в зонах.

Следует подчеркнуть, что полученные здесь численные значения n_i достоверно отображают только относительное различие этих величин в широтных поясах Юпитера, но ни в коем случае не могут использоваться для определения за ними аэрозольных веществ по следующим причинам:

— мы обнаружили существенное влияние на результаты возможных ошибок измерения отражательной способности деталей диска планеты, когда погрешность, например 5% , приводит к погрешности определения n_i в пределах 24% ;

— получаемые оценки относятся к некоему модельному, «усредненному по глубине» аэрозолю, распределенному по всей толщине слоя атмосферы, от ее верхнего края до уровня, сформировавшего рассматриваемую спектральную точку полосы поглощения атмосферного газа, поэтому они показывают усредненные характеристики аэрозолей, возможно имеющих в этом слое не только разную природу, но и различные размеры частиц;

Вычисленные значения величин $P(\lambda)$, $n_a(\lambda)$ (приведенных к $\lambda = 887.2$ нм), $n_a(\lambda)$ и $n_i(\lambda)$ для разных деталей диска Юпитера

λ , нм	P , бар	n_a	n_a	n_i	λ , нм	P , бар	n_a	n_a	n_i
EZ					SEB				
605.5	30.463	14.148	0.9967	0.00039	605.0	19.158	9.729	0.9940	0.00072
619.2	1.182	10.250	—	—	619.2	1.036	7.983	—	—
631.3	34.755	14.166	0.9974	0.00032	630.8	14.481	10.572	0.9940	0.00071
713.4	12.993	14.320	0.9975	0.00034	713.9	14.562	10.089	0.9948	0.00070
727.6	0.374	5.479	—	—	727.6	0.4205	4.677	—	—
741.4	9.718	15.252	0.9974	0.00036	741.4	12.245	10.749	0.9950	0.00069
NTrZ					NTB				
605.5	33.489	13.636	0.9972	0.00034	612.8	17.182	1.733	0.9465	0.00069
619.2	1.084	10.296	—	—	619.2	3.116	1.371	—	—
630.8	28.736	14.431	0.9974	0.00032	625.7	20.280	1.621	0.9497	0.00065
713.9	11.185	14.551	0.9969	0.00041	713.9	40.476	1.902	0.9461	0.00076
727.6	0.374	5.300	—	—	727.6	0.591	0.646	—	—
741.4	7.341	15.192	0.9968	0.00043	742.7	50.820	1.911	0.9486	0.00074
STrZ					STB				
605.5	29.090	15.239	0.9986	0.00017	607.2	6.593	7.980	0.9933	0.00098
619.2	1.185	11.060	—	—	619.2	1.491	6.279	—	—
630.8	27.109	16.174	0.9985	0.00019	630.8	7.850	8.395	0.9922	0.00097
714.7	12.512	15.413	0.9987	0.00017	711.7	10.3246	8.249	0.9916	0.00112
727.6	0.404	5.285	—	—	727.6	0.535	2.867	—	—
741.4	11.712	16.844	0.9986	0.00019	742.3	11.716	8.922	0.9919	0.00111
NEB									
605.5	11.856	11.341	0.9947	0.00063					
619.2	0.938	8.596	—	—					
631.3	10.716	11.760	0.9947	0.00065					
714.7	10.148	11.101	0.9945	0.00070					
727.6	0.387	4.853	—	—					
	0.426*	0.872*							
741.4	8.999	11.935	0.9946	0.00069					
	12.712*	12.8843*	0.9957*	0.00036*					

* — результаты расчетов для детали NEB при значении $r_{\text{ф}} = 0.8$ мкм

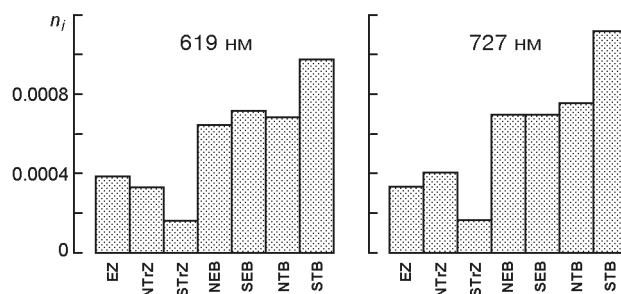


Рис. 1. Значения мнимой части показателя преломления аэрозоля в широтных деталях диска Юпитера в полосах поглощения метана на 619 и 727 нм, рассчитанные по данным работы [14]

— принятие нами для модельных расчетов заведомо недостоверного предположения о сферической форме аэрозольных частиц, так как реальные форма и параметры функции распределения по размерам аэрозольных частиц в атмосфере Юпитера на сегодня все еще не известны, выбор любой другой конкретной формы будет не более достоверным. Вероятнее всего, что в реальных условиях имеет место разнообразие форм облачных частиц, для учета чего необходимо вводить в модель атмосферы еще и функцию распределения частиц по формам.

Поскольку обнаруженные отличия значений у мнимой части показателя преломления аэрозольных частиц в разных широтных деталях диска Юпитера могут быть обусловлены различием не только природы, но и размера облачных частиц (или высотной стратификацией этих характеристик), очень важно попытаться хотя бы приближенно разделить влияние этих характеристик. Для таких исследований, как было показано, например, в работах [8, 36], необходимы наблюдательные данные в более широком интервале длин волн, хотя бы в пределах 600—900 нм.

ВЫВОДЫ

1. Обнаружено систематическое различие значений мнимой части показателя преломления аэрозольных частиц, рассчитанных для широтных деталей диска Юпитера. Наблюдается связь этих значений с типом широтных деталей: для светлых зон значения n_i существенно меньше, чем для темных поясов. Однотипные широтные детали, расположенные симметрично относительно экватора планеты, также различаются значениями n_i .

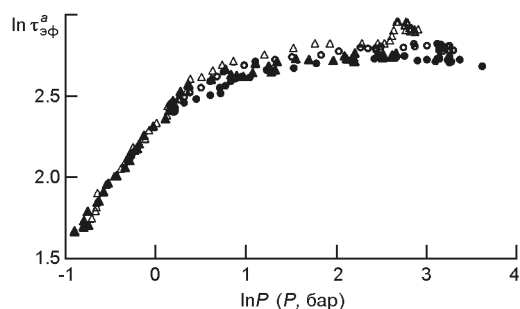
2. Анализ влияния изменения размера аэрозольных частиц на результаты расчетов показал, что обнаруженные различия величины n_i в широтных деталях могут указывать как на различную природу, так и на возможное изменение размеров аэрозольных частиц, преобладающих в облачных покровах Юпитера. А наиболее вероятно — на то и другое одновременно.

3. При относительно небольшом отклонении исходных значений отражательной способности детали диска планеты-гиганта величина n_i существенно изменяется. Однако, учитывая использование в работе единого источника исходных данных, можно говорить об уверенном определении относительных различий величины n_i для широтных деталей Юпитера.

4. Учет поглощения света аэрозодем позволяет получить более достоверные зависимости от давления аэрозольной рассеивательной составляющей, что особенно существенно при анализе данных в слабых полосах поглощения атмосферных газов (см. рис. 2).

5. В последующем оценить влияние неверного выбора формы аэрозольных частиц на результаты определения мнимой части комплекс-

Рис. 2. Зависимости $\ln \tau_{эф}^a$ от давления для STrZ Юпитера, рассчитанные с учетом поглощения аэрозолем в полосах поглощения метана 727 нм (темные и светлые треугольники — синее и красное крыло соответственно) и 619 нм (точки и кружки — синее и красное крыло соответственно)



сного показателя преломления аэрозоля в широтных деталях Юпитера будет возможно путем сравнения результатов данной работы с расчетами для частиц, имеющих форму хотя бы простой несферической морфологии (например сфероиды, цилиндры или фракталы).

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. Дементьев М. С., Мороженко А. В. О вертикальной неоднородности атмосфер Урана и Нептуна // Астрон. вестн.—1990.—24, № 2.—С. 127—134.
3. Койпер Д. Обзор атмосфер планет // Атмосферы Земли и планет / Под ред. Д. П. Койпера. — М.: Изд-во иностр. лит., 1951.—С. 341—385.
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. вестн.—1985.—19, № 1.—С. 64—76.
7. Мороженко А. В. Проблемы изучения вертикальных структур облачных слоев атмосфер планет-гигантов // Кинематика и физика небес. тел.—1993.—9, № 1.—С. 3—26.
8. 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.
9. Мороженко А. В. Различия вертикальных структур облачных слоев атмосфер планет-гигантов // Кинематика и физика небес. тел.—2001.—17, № 3.—С. 261—278.
10. Мороженко А. В., Овсак А. С. О возможности разделения аэрозольного и газового поглощений в длинноволновой области спектра планет-гигантов // Кинематика и физика небес. тел.—2015.—31, № 5.—С. 20—29.
11. Мороженко 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.
12. Мороженко О. В. Методи і результати дистанційного зондування планетних атмосфер. — Київ: Наук. думка, 2004.—648 с.
13. Овсак А. С. Изменения объемного коэффициента рассеяния аэрозоля в атмосфере Юпитера по данным наблюдений интегрального диска планеты // Кинематика и физика небес. тел.—2015.—31, № 4.—С. 61—71.

14. *Овсак А. С., Тейфель В. Г., Видьмаченко А. П., Лысенко П. Г.* Зональные различия облачного покрова Юпитера: Результаты анализа наблюдений в полосах поглощения метана 727 и 619 нм // Кинематика и физика небес. тел. — 2015.— **31**, № 3.— С. 23—39.
15. *Силл Г.* Химия цветных облаков Юпитера // Юпитер. II. Атмосфера, ионосфера / Под ред. Т. Герелса. — М.: Мир, 1979.—С. 206—220.
16. *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.
17. *Chamberlain J. W.* The atmosphere of Venus near cloud top // *Astrophys. J.*—1965.— **141**, N 4.—P. 1184—1205.
18. *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.
19. *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.
20. *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.
21. *Giver L. P.* Intensity measurements of the CH₄ bands in the region of 4350 to 10600 Å // *J. Quant. Spectroscop. and Radiat Transpher.*—1978.—**19**, N 2.—P. 311—32.
22. *Hansen J. E.* Circular polarization of sunlight reflected by clouds // *J. Atmos. Sci.* — 1971.—**28**, N 5.—P. 1515—1516.
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. *Karkoschka E.* Methane, ammonia, and temperature measurements of the Jovian planets and Titan from CCD-spectrophotometry // *Icarus.*—1998.—**133**, N 1.—P. 134—146.
25. *Kawata Y., Hansen J. E.* Circular polarization of sunlight reflected by Jupiter // *Jupiter. — Tucson, Ariz., 1976.*—P. 516—530.
26. *Lewis J. S.* The clouds of the Jupiter and the NH₃—H₂O and NH₃—H₂S systems // *Icarus.*—1969.—**10**, N 2.—P. 365—378.
27. *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>.
28. *Mishchenko M. I.* Physical properties of the upper troposphere aerosols in the equatorial region of Jupiter // *Icarus.*—1990.—**84**, N 2.—P. 296—304.
29. *Mishchenko M. I., Travis L. D., Kahn R. A., West R. A.* Modeling phase functions for dustlike tropospheric aerosols using a shape mixture of randomly oriented polydisperse spheroids // *J. Geophys. Res.*—1997.—**102**.—P. 16831—16847.
30. *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.
31. *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 / Eds R. West, H. Boehnhardt.* — Munich: ESO, 1995.—P. 267.

32. *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.
33. *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.
34. *Ovsak A. S.* Calculation of effective optical depth of absorption line formation in homogeneous semi-infinite planetary atmosphere during anisotropic scattering // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*.—2010.—**26**, N 2.—P. 86—88.
35. *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.
36. *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.
37. *Papazian H. A.* The colors of Jupiter // *Publs. Astron. Soc. Pacif.*—1959.—**71**, N 2.—P. 237—239.
38. *Sanchez-Lavega A., Legarreta J., Garcia-Melendo E., et al.* Colors of Jupiter's large anticyclones and the interaction of a Tropical Red Oval with the Great Red Spot in 2008 // *J. Geophys. Res.*—2013.—**118**, N 12.—P. 2537—2556.
39. *Seiff A., Kirk D. B., Knight T. C. D., et al.* Thermal structure of Jupiter's atmosphere near the edge of a 5-m hot spot in the North Equatorial Belt // *J. Geophys. Res.*—1998.—**103**, N 10.—P. 22857—22889.
40. *Urey H. C.* The planets, their origin, and development. — London: Oxford Univer. Press, 1952.—245 p.
41. *Weidenschilling S. J., Lewis L. S.* Atmospheric and cloud structures of the Jovian planets // *Icarus*.—1973.—**20**, N 3.—P. 465—476.
42. *Wildt R.* On the chemical nature of the colouration in Jupiter's cloud forms // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1939.—**99**, N 5.—P. 616—623.
43. *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.

Статья поступила в редакцию 09.04.15