

УДК 523.4-852-65

А. С. ОвсакГлавная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
03680 Киев, ул. Академика Заболотного 27**Модернизация метода анализа вертикальной
структуры аэрозольной составляющей атмосфер
планет-гигантов**

Разработан комплекс программ для определения характера изменения с глубиной оптической толщины аэрозоля или отношения оптических толщин аэрозольной и газовой составляющих в спектральных полосах поглощения атмосферных газов. Структурно комплекс состоит из следующих блоков: расчет по программе М. И. Мищенко коэффициентов x_i ; разложения индикатрисы рассеяния в ряд по полиномам Лежандра и объемного коэффициента рассеяния σ_0 полидисперсной среды с заданными показателем преломления и функцией $N(r)$ распределения частиц по размерам; формирование интерполяционного массива пар модельных значений альbedo однократного рассеяния ω и геометрического альbedo A_g для полубесконечной однородной среды с определенными в предыдущем блоке параметрами; определение значений альbedo однократного рассеяния путем сравнения рассчитанных и наблюдаемых значений геометрического альbedo для каждой точки измерений исследуемой полосы поглощения атмосферного газа (с учетом изменения индикатрисы рассеяния из-за рэлеевского рассеяния); расчет спектральных значений $\omega_{\text{эф}}$ эффективных оптических глубин формирования поля интенсивности света, диффузно отраженного исследуемой атмосферой; нахождение по данным ω и $\omega_{\text{эф}}$ рассеивательной и поглощательной составляющих эффективной оптической глубины ($s_{\text{эф}}$ и $s_{\text{эф}}$); определение количества поглощающего газа NL (в км-амагат) на луче зрения по данным $\omega_{\text{эф}}$, а по ним — атмосферного давления $p(NL)$ и газовой составляющей рассеивательной части оптической глубины $s_g(\lambda_0)$ на длине волны $\lambda_0 = 887.2$ нм; по данным $\omega_{\text{эф}}(\lambda)$ и $s_g(\lambda, NL)$ — нахождение аэрозольной составляющей $s_a(\lambda, NL)$; построение графической зависимости от давления пересчитанных на $\lambda_0 = 887.2$ нм значений $s_a(\lambda)$ или

отношения $\alpha_a(\lambda)$ и $\gamma_g(\lambda)$. Комплекс программ был апробирован для анализа данных спектрофотометрических измерений интегрального диска Юпитера в контурах сильных полос поглощения метана с центрами на $\lambda = 841.6, 864$ и 887.2 нм в предположении двух вариантов функции распределения частиц по размерам (модифицированное гамма-распределение и нормально-логарифмическое). Выявлено, что для одной и той же среды при близких результатах вычислений анализ в модели гамма-распределения выполняется в несколько раз быстрее.

МОДЕРНІЗАЦІЯ МЕТОДУ АНАЛІЗУ ВЕРТИКАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ АЭРОЗОЛЬНОЇ СКЛАДОВОЇ АТМОСФЕР ПЛАНЕТ-ГІГАНТІВ, Обсак О. С. — Розроблено комплекс програм для визначення характеру зміни з глибиною оптичної товщини аерозолі або відношення оптичних товщин аерозольної та газової складових у спектральних смугах поглинання атмосферних газів. Структурно комплекс складається з наступних блоків: розрахунок за програмою М. І. Міщенко коефіцієнтів x_i , розкладу індикатриси розсіяння в ряд за поліномами Лежандра і об'ємного коефіцієнта розсіяння σ_0 полідисперсного середовища з заданими показником заломлення і функцією $N(r)$ розподілу частинок за розмірами; формування інтерполяційного масиву пар модельних значень альbedo однократного розсіяння і геометричного альbedo A_g для півнескінченного однорідного середовища з параметрами, розрахованими у попередньому блоці; визначення значень альbedo однократного розсіяння шляхом порівняння розрахованих й спостережених значень геометричного альbedo для кожної точки вимірювань досліджуваної смуги поглинання атмосферного газу (з урахуванням зміни індикатриси розсіяння через релєйське розсіяння); розрахунок спектральних значень $\tau_{\text{еф}}$ ефективних оптичних глибин формування поля інтенсивності світла, дифузно відбитого досліджуваною атмосферою; знаходження за даними про $\tau_{\text{еф}}$ розсіювальної і поглинальної складових ефективної оптичної глибини ($\tau_{\text{еф}}^s(\lambda)$ і $\tau_{\text{еф}}^a(\lambda)$); визначення кількості поглинального газу NL (в км-амагат) на промені зору за даними про $\tau_{\text{еф}}^a$, а по ній — атмосферного тиску $p(NL)$ і газової складової розсіювальної частини оптичної глибини $\gamma_g(\lambda_0)$ на довжині хвилі $\lambda_0 = 887.2$ нм; за даними про $\tau_{\text{еф}}^s(\lambda)$ і $\gamma_g(\lambda, NL)$ — знаходження аерозольної складової $\alpha_a(\lambda, NL)$; побудова графічної залежності від тиску перерахованих на $\lambda_0 = 887.2$ нм значень $\alpha_a(\lambda)$ та відношення $\alpha_a(\lambda) / \gamma_g(\lambda)$. Комплекс програм було апробовано для аналізу даних спектрофотометричних вимірювань інтегрального диску Юпітера у контурах сильних смуг поглинання метану з центрами на $\lambda = 841.6, 864$ і 887.2 нм у припущенні двох варіантів функції розподілу частинок за розмірами (модифікований гамма-розподіл та нормально-логарифмічний). Виявлено, що для одного й того ж середовища, при близьких результатах обчислень, аналіз у моделі гамма-розподілу виконується у декілька разів швидше.

A MODERNIZATION OF THE ANALYSIS METHOD FOR VERTICAL STRUCTURE OF AEROSOL COMPONENT IN GIANT PLANET ATMOSPHERES, by Ovsak A. S. — We developed a program package to determine the nature of the depth change of aerosol optical thickness or the optical thickness ratio for aerosolic and gas components for spectral absorption bands of atmospheric gases. Structurally, the program package consists of the following units: the calculation program of M. I. Mischenko to determine coefficients x_i of the scattering function expansion in a series of Legendre polynomials and volumetric scattering coefficient τ_0 for the polydisperse media with a specified refractive index and function for the particle size distribution $N(r)$; the formation of the interpolative array of calculated values for single scattering albedo ω_0 and geometric albedo A_g in the case of a semi-infinite homogeneous layer with the parameters determined in the previous unit; determining the values of the single scattering albedo ω_0 by comparing calculated and observed values of geometric albedo for each measuring points of the investigated absorption band of methane (including changes of scattering function due to the Rayleigh scattering); the calculation of spectral values of the effective optical depth τ_{eff} which forms the intensity field of light diffusely reflected by upper atmosphere gas-aerosol layer; finding the scattering (τ_{eff}^s) and absorbing (τ_{eff}^a) components of effective optical depth on the basis of τ_{eff} and ω_0 data; the determination of the amount of methane NL (in km-amagat) on the line of sight with the use of τ_{eff} data and then an atmospheric pressure $p(NL)$ and gas scattering component $\tau_g(\lambda_0)$ of full optical depth at the wavelength $\lambda_0 = 887.2$ nm; finding an aerosol component $\tau_a(\lambda, NL)$ according to the data on $\tau_{eff}^s(\lambda)$ and $\tau_g(\lambda, NL)$; building a graphical relationship between pressure p and values $\tau_a(\lambda)$ converted at $\lambda_0 = 887.2$ nm or $\tau_a(\lambda) / \tau_g(\lambda)$. The program package was validated to perform an analysis of spectrophotometric measurements of Jupiter's integrated disk in strong absorption bands of methane centered at 841.6 nm, 864.0 nm, and 887.2 nm. This analysis was carried out for two versions of function of particle size distribution (the modified gamma distribution and normal-logarithmic one). We found that the analysis in the gamma distribution model is performed several times faster for the same environment and with close results.

ВВЕДЕНИЕ

Апробация программного комплекса для определения параметров вертикальной структуры облачных слоев осуществлялась на примере атмосферы Юпитера. Уже первые данные об интенсивности полос молекулярного поглощения метана в спектре Юпитера, а также ее распределении по диску были использованы для определения количества поглощающего газа [25], для чего необходимо было задать модель вертикальной структуры атмосферы. Первоначально предполагалось, что молекулярное поглощение формируется в оптически тонком (по

рассеивательной составляющей) чисто поглощающем слое, расположенном выше рассеивающего облачного слоя полубесконечной оптической толщины. Получаемые при этом разные значения количества газа для различных точек диска Юпитера приписывались изменению границы облачного слоя. Несколько позже началось использование модели однородного газовой-аэрозольного слоя [1], а позже — простейших неоднородных моделей, в которых над газовой-аэрозольным слоем находится оптически тонкий чисто газовый слой [14].

Моделирование процессов конденсации различных газов в атмосферах планет-гигантов стимулировало дальнейшее усложнение применяемых моделей. В работах [30, 45, 46] было показано, что верхняя часть облачного слоя атмосфер планет-гигантов должна состоять из разнесенных по глубине двух или трех оптически тонких слоев с различающимися параметрами. В результате с начала 1970-х годов в основном с применением именно таких моделей и выполняется анализ распределений интенсивности полос (линий) поглощения атмосферных газов по диску [17, 18, 19, 21, 22, 32, 33, 40—42, 44—46], а также фазовых зависимостей альbedo дисков [36]. В дальнейшем по наземным наблюдениям изменения блеска галилеевых спутников в период их входа (выхода) в тень Юпитера [37], а позже и с орбитальных модулей космических аппаратов [39], был обнаружен стратосферный аэрозоль. Поэтому сложные модели вертикальной структуры стали дополняться еще и слоем стратосферного аэрозоля.

По мере усложнения моделей атмосфер планет-гигантов все острее становилась проблема однозначности оценки и выбора значения того или иного параметра для каждого отдельного слоя. Если в модели чисто поглощающего надоблачного слоя необходимо определять значение только одного параметра (поглощающей составляющей оптической толщины), а в модели полубесконечного газовой-аэрозольного слоя — двух параметров (альbedo однократного рассеяния и индикатрисы рассеяния), то в сложных моделях количество неизвестных параметров может составлять 10 и более (см. [10], с. 460—466).

Принципиально иной подход к проблеме изучения вертикальной структуры облачных слоев планет-гигантов предложил в начале 1980-х годов А. В. Мороженко [5—7] (далее — метод Мороженко). Этот метод основан на идее Й. Чемберлена [20] о том, что при взаимодействии света с газовой-аэрозольной средой очень большой оптической толщины реальную возможность выйти из него наружу имеют только те световые кванты, которые достигли не более определенной (эффективной) оптической глубины $\tau_{\text{эф}}$. Подробно метод будет описан ниже, здесь же мы только отметим, что метод Мороженко применялся при анализе спектрофотометрических измерений как отдельных деталей диска [3, 5, 6, 13], так и интегрального диска [9, 11, 12] планет-гигантов. Было показано, что по результатам анализа данных всех измерений вертикальная структура верхнего слоя атмосферы Юпите-

ра не отвечает условию однородности оптических свойств, а характер изменения эффективной оптической толщины аэрозольной составляющей с высотой [12, 13] удовлетворительно согласуется с данными прямого зондирования КА «Галилео» атмосферы в экваториальной части диска Юпитера [38]. Кроме того, оказалось, что зоны и полосы диска Юпитера характеризуются различными вертикальными структурами облачного слоя [3, 6], а вертикальная структура в месте падения фрагмента К кометы Шумейкера—Леви 9 также имела существенные отличия от структуры невозмущенного места та той же широте [13]. Также было показано, что анализ данных для расположенных на различных длинах волн контуров полос поглощения метана позволяет определять (или уточнять) величину размера частиц [8, 13]. В перечисленных работах не учитывалась зависимость поглощательной составляющей эффективной оптической глубины $\tau_{\text{эф}}$ от изменения значений коэффициентов x_i разложения индикатрисы рассеяния в ряд по полиномам Лежандра при изменении относительной концентрации поглощающего газа с глубиной. Для рассеивательной составляющей $\tau_{\text{эф}}^s$ такая зависимость учитывалась, но принималось, что характер этой зависимости одинаков для всех спектральных значений отражательной способности. Поскольку в действительности это в той или иной мере не оправдывается [15], данная работа посвящена разработке метода анализа, строго учитывающего указанные выше зависимости. Также, вместо используемой ранее двухпараметрической индикатрисы рассеяния Хеньи—Гринстейна, здесь применяется расчет по теории Ми параметров индикатрисы рассеяния для заданных значений действительной части показателя преломления и функций распределения аэрозольных частиц по размерам.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА МОРОЖЕНКО

При определении вертикальной структуры облачных слоев исследуемой атмосферы по методу Мороженко применяется следующая последовательность операций.

1. Выбираются значения действительной части показателя преломления, вид и параметры функции распределения облачных частиц по размерам, и по ним рассчитываются объемный коэффициент рассеяния σ_a среды и коэффициенты x_i^a разложения индикатрисы рассеяния в ряд по полиномам Лежандра.

2. Путем сравнения наблюдаемой отражательной способности детали или видимого альbedo диска и модельных значений, рассчитанных для однородного полубесконечного газовой-аэрозольного слоя с помощью определенных в п. 1 коэффициентов x_i^a , определяются значения альbedo однократного рассеяния для каждой точки исследуемого контура спектральной полосы поглощения метана.

3. По найденным значениям σ_a рассчитываются значения $\tau_{\text{эф}}$, а по ним — рассеивательной и поглощательной составляющих:

$$\frac{s}{\varepsilon_{\text{эф}}} \quad \varepsilon_{\text{эф}}^s \quad (1)$$

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

Здесь индексы s и a обозначают аэрозольное поглощение в непрерывном спектре и молекулярное поглощение газа в полосах поглощения.

4. После учета поглощения в непрерывном спектре ($\varepsilon_{\text{эф}}^s$) [11] или его пренебрежении (при анализе участка спектра с сильным поглощением) по данным о $\varepsilon_{\text{эф}}^a$ рассчитывается количество метана (в км-амат) на луче зрения:

$$\varepsilon_{\text{эф}}^a / k, \quad (3)$$

где k — монохроматический коэффициент поглощения метана, значение которого существенно зависит от длины волны и физических характеристик атмосферы в области расположения слоя, формирующего исследуемую полосу поглощения метана.

5. По данным об NL (в модели заданных химического состава атмосферы и значения относительной концентрации метана) рассчитываются спектральные значения газовой рассеивательной составляющей эффективной оптической глубины:

$$\varepsilon_{\text{эф}}^g(\lambda) = \frac{NL}{g(\lambda)} \quad (4)$$

где $g(\lambda)$ — коэффициент рассеяния газа.

6. Рассчитываются значения параметра относительного вклада газа:

$$\frac{\varepsilon_{\text{эф}}^g}{\varepsilon_{\text{эф}}^s} \quad (5)$$

по которым уточняются значения коэффициентов разложения индикатрисы рассеяния газовой-аэрозольной среды:

$$x_i^j = (1 - x_i^a) x_i^g, \quad (6)$$

где x_i^g — коэффициенты разложения рэлеевской индикатрисы рассеяния.

7. Этапы 2—6 повторяются до тех пор, пока текущее рассчитанное значение отражательной способности (или альбедо) будет отличаться от предыдущего на величину заданной погрешности вычислений. Полученные параметры газовой-аэрозольной среды принимаются окончательными.

8. На заключительном этапе для каждой точки контура полосы поглощения рассчитываются значения аэрозольной рассеивательной составляющей оптической глубины:

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

С помощью того или иного выражения (например [12]) определяются значения атмосферного давления p , что позволяет получить гра-

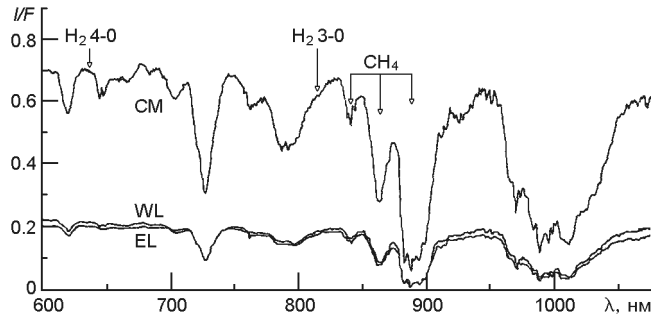


Рис. 1. Отражательная способность центра диска, а также восточного и западного лимбов Юпитера по данным [47]

фические зависимости $a_{\text{эф}}$ или $\frac{a}{g}_{\text{эф}}$ от p . При этом значения $a_{\text{эф}}$ и $\frac{a}{g}_{\text{эф}}$ должны быть приведены к одной и той же длине волны.

При наличии в исследуемой среде поглощающего газа учет поглощения в непрерывном спектре является весьма проблематичным и неоднозначным, что обусловлено трудностью определения его значений. Так, для длин волн > 530 нм практически нет участков спектра с нулевым поглощением метана [24]. Пример спектрального хода отражательной способности Юпитера в диапазоне 600—1070 нм, полученного в работе [47], приведен на рис. 1.

МЕТОДЫ РАСЧЕТА $a_{\text{эф}}$

Впервые аналитическое выражение для $a_{\text{эф}}$ при изотропной индикатрисе рассеяния в полубесконечной однородной среде было получено Й. Чемберленом [20]. Выражение для анизотропной полубесконечной среды с индикатрисой рассеяния произвольной формы предложил Э. Г. Яновицкий в работе [2]:

$$a_{\text{эф}}(\theta_0) = \frac{3}{3 - x_1} \frac{\int_0^1 \int_0^{2\pi} (\langle \mu \rangle^2 - \mu_0^2) d\mu d\phi}{\int_0^1 \int_0^{2\pi} \mu d\mu d\phi}, \quad (8)$$

где x_1 — первый коэффициент разложения индикатрисы рассеяния по полиномам Лежандра, $\langle \mu \rangle$ — усредненный по азимуту коэффициент отражения среды.

В работе [16] приведено выражение для $a_{\text{эф}}$ с учетом фазовой зависимости:

$$a_{\text{эф}}(\theta, \theta_0) = \frac{\sum_{m=1}^{\infty} A_h^0(\theta, \theta_0) \frac{2}{m-1} A_h^m(\theta, \theta_0) \cos m}{\sum_{m=1}^{\infty} (C_h^0(\theta, \theta_0) \frac{2}{m-1} C_h^m(\theta, \theta_0) \cos m)}, \quad (9)$$

где

$$C_h^m(\theta, \theta_0) = \frac{1}{4} \int_0^1 Q^m(\theta, \theta_0) \int_0^1 Q^m(\theta, \theta_0) Q^m(\theta, \theta) d\theta, \\ A_h^m(\theta, \theta_0) = \frac{1}{4} \int_0^1 Q^m(\theta, \theta_0) \int_0^1 Q^m(\theta, \theta_0) Q^m(\theta, \theta) (\theta)^2 d\theta + \\ + T^m(\theta, \theta_0) \int_0^1 Q^m(\theta, \theta_0) T^m(\theta, \theta) d\theta, \quad (10)$$

$$Q^m(\theta, \theta_0) = \frac{(2i-1)x_i^m P_i^m(\theta) P_i^m(\theta_0)}{i m 2i-1 x_i}, \quad (11)$$

$$x_i^m = x_i \frac{(i-m)!}{(i+m)!}, \quad (12)$$

$$T^m(\theta, \theta_0) = \frac{1}{2} \int_0^1 Q^m(\theta, \theta) Q^m(\theta, \theta_0) d\theta. \quad (13)$$

Здесь $P_i^m(\theta)$ — присоединенные функции Лежандра, $m = 0, \dots, i$.

Выражение (9) используется в данной работе при расчете значений $\alpha_{\text{эф}}(\theta, \theta_0)$.

При расчете коэффициента отражения $\alpha_{\text{эф}}(\theta, \theta_0)$ полубесконечной однородной газовой-аэрозольной атмосферы мы использовали соотношение инвариантности в форме уравнения Амбарцумяна для его азимутальных гармоник:

$$\alpha(\theta, \theta_0) \int_0^1 Q^m(\theta, \theta_0) \int_0^1 Q^m(\theta, \theta) Q^m(\theta, \theta_0) d\theta = \\ = \int_0^1 Q^m(\theta, \theta_0) \int_0^1 Q^m(\theta, \theta) d\theta + \\ + 4 \int_0^1 Q^m(\theta, \theta) \int_0^1 Q^m(\theta, \theta) Q^m(\theta, \theta_0) d\theta. \quad (14)$$

Решение уравнения выполнялось методом дискретных ординат с ускорением его сходимости по методике Ж. М. Длугач и Э. Г. Яновичского [23]. Полный коэффициент отражения атмосферы равен

$$\alpha(\theta, \theta_0) = \int_0^N \alpha_0(\theta, \theta_0) \int_{m=1}^N Q^m(\theta, \theta_0) \cos m \theta d\theta. \quad (15)$$

Значение геометрического альbedo определялось из выражения

$$A_g = \int_0^1 \alpha(\theta, \theta) d\theta. \quad (16)$$

АПРОБАЦИЯ МЕТОДА

При апробации полученного метода был выполнен анализ данных о спектральном альbedo диска Юпитера (см. [27, 28], а также сайт

[http://pds-tmospheres.nmsu.edu/data_and_services/atmospheres_data/catalog.htm]). Для модельных расчетов нами использовались значения действительной части показателя преломления n_r и параметров функции распределения частиц по размерам, полученные из анализа одних и тех же данных поляриметрических наблюдений атмосферы Юпитера в двух независимых работах [31, 35]. Так, в работе М. И. Мищенко [31], где анализ был выполнен со строгим учетом многократного рассеяния, были получены значения действительной части коэффициента преломления $n_r = 1.38...1.40$ и в предположении модифицированного гамма-распределения частиц по размерам и эффективного радиуса частиц $r_{\text{эф}} = 0.29...0.47$ мкм при дисперсии размеров $\sigma = 0.45$. В работе А. В. Мороженко и Э. Г. Яновицкого [35] многократное рассеяние учитывалось приближенно и в предположении нормально-логарифмического распределения частиц по размерам. Здесь были получены следующие значения: $n_r = 1.35...1.37$, средний геометрический радиус $r_0 = 0.29...0.47$ мкм при дисперсии $\sigma = 0.26...0.30$. Пересчет этих параметров на модифицированное гамма-распределение частиц по размерам дает значения эффективного радиуса $r_{\text{эф}} = 0.40$ мкм и дисперсию размеров $\sigma = 0.35$, что близко к результатам работы [31]. Расчет значений коэффициентов x_i разложения индикатрисы рассеяния в ряд по полиномам Лежандра и объемных коэффициентов рассеяния $a_i(x_i)$ выполнялся с использованием части компьютерной программы, разработанной М. И. Мищенко для расчета матрицы рассеяния полидисперсной среды, содержащей однородные сферические частицы, с соответствующей функцией распределения частиц по размерам. Так как в данной работе анализировались данные для интегрального диска Юпитера, поэтому значения $a_i(x_i, \theta_0)$ рассчитывались при нулевом фазовом угле ($\theta_0 = 0$ и $\theta_0 = \pi$). При вычислении значений величин рассеивательной и поглощательной составляющих $\sigma_{\text{эф}}^s$ и $\sigma_{\text{эф}}$ эффективной оптической глубины использовались значения k , рассчитанные А. В. Мороженко [11] с учетом температурного профиля атмосферы Юпитера. Эти данные размещены на сайте ГАО НАН Украины [http://www.mao.kiev.ua/eng/dept/ssystem_morozhenko_e.html].

В работе анализировались наблюдательные данные в контурах сильных полос поглощения метана на длинах волн 842, 864 и 887 нм (см. рис. 1), поэтому поглощение в непрерывном спектре считалось пренебрежимо малым. В работах [11, 12] для модели атмосферы Юпитера с относительными концентрациями водорода (0.85) и гелия (0.15) приведены связи между газовой оптической толщиной на длине волны $\lambda_0 = 887.2$ нм и количеством метана с относительной концентрацией метана:

$$\ln \frac{\sigma_{\text{эф}}^g(\lambda_0)}{\sigma_{\text{эф}}^g(\lambda_0)} = \ln NL \ln 8.123 \quad (17)$$

и

$$\ln p = \ln A \ln NL \ln 8.123, \quad (18)$$

где $\ln A = 4.465$ при $\ln g = 1$ на $\lambda_0 = 887.2$ нм. Для относительной кон-

центрации метана принималось приведенное в работе [12] значение $= 0.0021$.

Определение вида изменения характеристик аэрозоля в атмосфере Юпитера с глубиной велось в указанной выше последовательности операций. Как видим, для нахождения значения аэрозольной составляющей $a(\lambda)$ эффективной оптической глубины на произвольной длине волны λ_i по выражению (7) необходимо определять газовую оптическую толщину $\tau_{\text{эф}}^g$ на этой длине волны. Ее значение находилось в соответствии с выражением [12]

$$\ln \tau_{\text{эф}}^g(\lambda_i) = \ln \tau_{\text{эф}}^g(\lambda_0) + 4 \ln(\lambda_0 / \lambda_i). \quad (19)$$

Значения $a(\lambda)$ пересчитывались на длину волны λ_0 по выражению

$$a(\lambda) = a(\lambda_0) \cdot a(\lambda) / a(\lambda_0). \quad (20)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Основным результатом данной работы можно считать создание комплекса компьютерных программных модулей, объединившего в себе:

— ввод и подготовку для дальнейшей обработки независимых входных данных из различных источников;

— расчет характеристик полидисперсных рассеивающих сред в широком диапазоне значений действительной и мнимой части коэффициента проницаемости и размеров содержащихся в них частиц, а также для различных видов и параметров функций распределения этих частиц по размерам;

— расчет характеристик светового поля, диффузно отраженного анизотропными полубесконечными средами с индикатрисой рассеяния произвольной формы;

— автоматический подбор соответствующих измерительным данным спектральных значений геометрического альбедо или отражательной способности, а также определение значений альбедо однократного рассеяния среды;

— учет влияния молекулярного рассеяния на изменение формы индикатрисы рассеяния с глубиной;

— расчет и выдача спектральных значений величин, характеризующих вертикальную структуру верхних облачных слоев исследуемой атмосферы.

2. Следует отметить, что при расчете значений $\tau_{\text{эф}}^g$ по выражению (4) в работе [15] использовалась индикатриса рассеяния Хеньи — Гринштейна, а в данной работе расчеты выполнены для среды, у которой коэффициенты разложения индикатрисы рассеяния по полиномам Лежандра x_l рассчитывались с учетом размеров облачных частиц, вида и параметров их функции распределения по размерам.

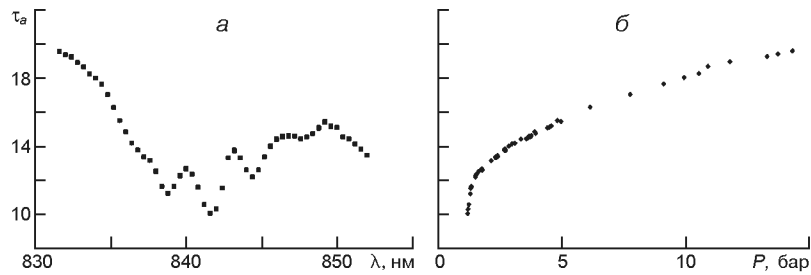


Рис. 2. Зависимость аэрозольной составляющей τ_a оптической глубины атмосферы Юпитера в полосе поглощения метана с центром на $\lambda = 841.6$ нм: *a* — от длины волны, *б* — от давления P в атмосфере Юпитера

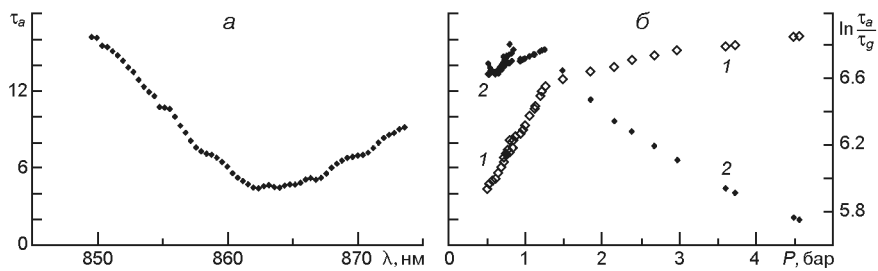


Рис. 3. То же для полосы поглощения метана с центром на $\lambda = 864.0$ нм. Кривая 1 — $\tau_a(P)$, 2 — $\ln(\tau_a / \tau_g(P))$

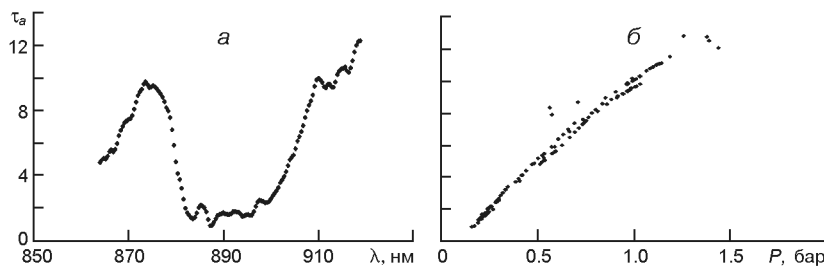


Рис. 4. То же для полосы поглощения метана с центром на $\lambda = 887.2$ нм

3. Возможности разработанного комплекса программ апробированы нами при обработке результатов спектрофотометрических измерений геометрического альбедо Юпитера [27, 28] для ряда полос поглощения атмосферного метана с центрами на 841.6, 864 и 887.2 нм.

4. Полученные зависимости от длины волны и от давления в атмосфере аэрозольной составляющей, а также $\ln(\tau_a / \tau_g)$ приведены на рис. 2—5.

5. Полученные в работе результаты подтверждают вертикальную неоднородность верхнего облачного слоя атмосферы Юпитера. Анализ графических зависимостей величин, рассчитанных для полос с центрами на 841.6 и 864.0 нм (см. рис. 2, б, рис. 3, б) указывает на наличие уровня с давлением 1.25 бар, на котором объемный коэффициент рассеяния аэрозоля имеет максимальное значение. Более того, в отличие от результатов обработки этих же исходных данных в работе [12],

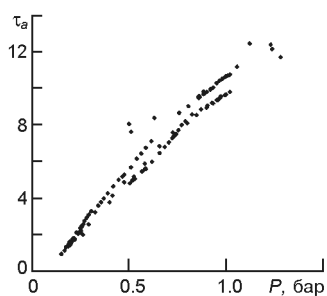


Рис. 5. Зависимость аэрозольной составляющей оптической глубины в полосе поглощения метана с центром на $\lambda = 887.2$ нм от величины давления в атмосфере Юпитера для нормально-логарифмического распределения частиц аэрозоля по размерам

положение этого уровня соответствует результатам нефелометрического эксперимента, выполненного зондом «Галилео» [38].

6. Близость результатов для широкой полосы с центром на $\lambda = 887.2$ нм (см. рис. 4 и 5), рассчитанных для двух различных наборов параметров аэрозоля для верхних слоев атмосферы Юпитера, полученных в независимых работах М. И. Мищенко [31] и А. В. Мороженко, Э. Г. Яновицкого [35], можно рассматривать как подтверждение того, что определенные в обеих работах значения параметров атмосферы Юпитера близки к реальным. В следующих работах планируется исследовать возможные причины небольшого разноса точек между коротко- и длинноволновым крыльями полосы, который более заметен при расчете с применением функции нормально-логарифмического распределения частиц по размерам.

6. Получение близких значений расчетных величин, при значительно меньших затратах машинного времени вычислений с использованием модифицированного гамма-распределения аэрозольных частиц по размерам по сравнению с такими же расчетами с использованием функции нормально-логарифмического распределения частиц является еще одним важным результатом данной работы.

ВЫВОДЫ

1. Применение программного комплекса позволяет оперативно выполнять анализ спектрофотометрических данных и определять вероятную вертикальную структуру аэрозольной составляющей и другие параметры атмосфер большой оптической толщины.

2. Так же, как и для других методов анализа дистанционных измерений поля интенсивности диффузно отраженного света с решением обратных задач атмосферной оптики, необходимым условием для получения правильных результатов расчетов данным программным комплексом является использование истинных значений мономатричных коэффициентов поглощения света газами в физических условиях атмосфер планет-гигантов. Кроме указанных выше работ А. В. Мороженко, проблеме определения значений мономатричных коэффициентов поглощения метана k посвящено ряд работ, среди них можно выделить работы [26, 29, 43]. Полученное нами совпадение расчетного уровня максимальной плотности аммиачного облака с

данными зонда КА «Галилео» свидетельствует, вероятно, о близости значений величин k , определенных А. В. Мороженко, к реальным. Если в дальнейшем будет повышена точность дистанционных измерений и будут получены истинные значения коэффициентов k в атмосферах планет-гигантов, то можно будет ожидать увеличения точности определения вертикальной структуры и микрофизических свойств атмосфер планет-гигантов по методике, описанной в данной работе.

3. После тестовой проверки возможностей работы комплекса компьютерных программ на проверенных предыдущими работами результатах для атмосферы Юпитера, планируется его применение для оценки вероятной вертикальной структуры облачных слоев, размеров аэрозольных частиц, относительной концентрации поглощающих газов и ряда других характеристик атмосферы Юпитера и остальных планет-гигантов.

Автор благодарит А. В. Мороженко за советы и существенные замечания, а также М. И. Мищенко за предоставленную возможность использования его компьютерной программы расчета характеристик рассеивающей среды.

1. Аврамчук В. В. Определение оптических параметров атмосферы Юпитера // Астрон. циркуляр.—1968.—№ 484.—С. 4—6.
2. Аврамчук В. В., Бугаенко Л. А., Мороженко А. В. и др. Результаты исследований Юпитера, выполненные в Главной астрономической обсерватории АН УССР // Астрометрия и астрофизика.—1977.—Вып. 31.—С. 54—68.
3. Дементьев М. С., Мороженко А. В. Зоны и полосы диска Юпитера. Различие в вертикальной структуре облачных слоев // Астрон. вестн.—1990.—24, № 4.—С. 275—287.
4. Ибрагимов К. Ю. Численное моделирование слоистообразной облачности в атмосферах планет-гигантов. — Алма-Ата: Наука, 1990.—239 с.
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.—24, № 1.—С. 64—76.
7. Мороженко А. В. Проблемы изучения вертикальных структур атмосфер планет-гигантов // Кинематика и физика небес. тел.—1993.—9, № 6.—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 // Кинематика и физика небес. тел.—1999.—15, № 2.—С. 110—122.
9. Мороженко А. В. Различие вертикальных структур облачных слоев атмосфер планет-гигантов // Кинематика и физика небес. тел.—2001.—17, № 3.—С. 261—278.
10. Мороженко О. В. Методи і результати дистанційного зондування планетних атмосфер. — Київ: Наук. думка, 2004.—647 с.
11. Мороженко А. В. Переопределение значений монохроматических коэффициентов поглощения метана с учетом тепловых режимов планет-гигантов. IV. Юпитер и Сатурн // Кинематика и физика небес. тел.—2007.—23, № 6.—С. 337—348.
12. Мороженко А. В., Овсак А. С. Зависимости аэрозольной составляющей оптической толщины и относительной концентрации метана от глубины в атмосфере

- рах планет-гигантов // Кинематика и физика небес. тел.—2009.—**25**, № 4.— С. 243—258.
13. *Мороженко А. В., Овсак А. С., Корсун П. П.* Вертикальная структура облачного слоя Юпитера до и после столкновения с кометой Шумейкера — Леви 9 // Кинематика и физика небес. тел.—1995.—**11**, № 4.—С. 3—20.
 14. *Мороженко А. В., Яновицкий Э. Г.* Параметры вертикальной структуры верхних слоев атмосферы Юпитера // Письма в Астрон. журн.—1976.—**2**, № 11.— С. 549—553.
 15. *Овсак А. С.* Расчет эффективной оптической глубины формирования линии поглощения в однородной полубесконечной планетной атмосфере при анизотропном рассеянии // Кинематика и физика небес. тел.—2010.—**26**, № 1.— С. 79—82.
 16. *Яновицкий Э. Г., Овсак А. С.* Эффективная оптическая глубина формирования линии поглощения в полубесконечной планетной атмосфере // Кинематика и физика небес. тел.—1997.—**13**, № 4.—С. 3—21.
 17. *Atreya S. K., Donahue T. M., Festou M. C.* Jupiter — Structure and composition of the upper atmosphere // *Astrophys. J.*—1981.—**247**, N 1.—P. L43—L47.
 18. *Axel L.* Inhomogenous model of the atmosphere of Jupiter // *Astrophys. J.*—1972.—**173**, N 2.—P. 451—468.
 19. *Bergstralh J. T.* Methane absorption in the Jovian atmosphere. II. Absorption line formation // *Icarus.*—1973.—**19**, N 3.—P. 390—418.
 20. *Chamberlain J. W.* The atmosphere of Venus near cloud top // *Astrophys. J.*—1965.—**141**, N 4.—P. 1184—1205.
 21. *Choi D. S., Simon-Miller A. A.* An analysis of Cassini observations regarding the structure of Jupiter's equatorial atmosphere // American Geophysical Union's 45th Annual Fall Meeting, 3—7 Dec. 2012, San Francisco, CA. — <http://ntrs.nasa.gov/search.jsp?N=0&Ntk=All&Ntx=mode+matchallany&Ntt=Jupiter+upper+atmosphere+structure>.
 22. *Danielson R. E., Tomasko M. G.* A two-layer model of the Jovian clouds // *J. Atmos. Sci.*—1969.—**26**, N 5.—P. 889—897.
 23. *Dlugach J. M., Yanovitskiy E. G.* The optical properties of Venus and the Jovian planets. II. Methods and results of calculations of the intensity of radiation diffusely reflected from semi-infinite homogeneous atmosphere // *Icarus.*—1974.—**22**, N 1.—P. 66—81.
 24. *Giver L. P.* Intensity measurements of the CH₄ bands in the region of 4350 to 10600 Å // *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transpher.*—1978.—**19**, N 2.—P. 311—322.
 25. *Hess S. L.* Variations in atmospheric absorption over the disk of Jupiter and Saturn // *Astrophys. J.*—1953.—**18**, N 1.—P. 151—160.
 26. *Irwin P. G. J., Calcutt S. B., Taylor F. W., Weirand A. L.* Calculated k distribution coefficients for hydrogen- and self-broadened methane in the range 2000—9500 cm⁻¹ from exponential sum fitting to band-modelled spectra // *J. Geophys. Res.*—1996.—**101**, N E11.—P. 26137—26154.
 27. *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.
 28. *Karkoschka E.* Methane, Ammonia, and temperature measurements of the Jovian planets and Titan from CCD-spectrophotometry // *Icarus.*—1998.—**133**, N 1.—P. 133—146.
 29. *Karkoschka E., Tomasko M. G.* Methane absorption coefficients for the jovian planets from laboratory, Huygens, and HST data // *Icarus.*—2010.—**205**, N 2.—P. 674—694.
 30. *Lewis J. S.* The clouds of the Jupiter's and the NH₃—H₂O and NH₃—H₂S systems // *Icarus.*—1969.—**10**, N 3.—P. 365—378.

31. *Mishchenko M. I.* Physical properties of the upper troposphere aerosols in the equatorial region of Jupiter // *Icarus*.—1990.—**84**, N 2.—P. 296—304.
32. *Molina A., Moreno F., Lopes-Moreno J. J.* Equatorial cloud structure of Jupiter derived from high resolution spectroscopy in the 6300—6825 Å // *Astron. and Astrophys.*—1989.—**226**, N 1.—P. 311—317.
33. *Moreno F., Molina A.* Jupiter's atmospheric parameters derived from spectroscopic observations in the red region during the 1988 opposition // *Astron. and Astrophys.*—1991.—**241**, N 1.—P. 243—250.
34. *Morozhenko A. V.* Monochromatic absorption coefficients of methane and ammonia with regard to thermal conditions in giant planet atmospheres.— Режим доступа http://www.mao.kiev.ua/eng/dept/ssystem_morozhenko_e.html.
35. *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.
36. *Pollack J. B., Rages K., Baines K. H., et al.* Estimations of the bolometric albedo and radiance balance of Uranus and Neptune // *Icarus*.—1986.—**65**, N 2/3.—P. 442—466.
37. *Price M. J., Hall J. S., Boyse P. B., et al.* 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.
38. *Ragent B., Colburn S., Rages K. A., et al.* The clouds of Jupiter: Results of the Galileo Jupiter mission probe Nephelometer experiment // *J. Geophys. Res.*—1998.—**103**, N E10.—P. 22891—22909.
39. *Rages K., Beebe R., Senske D.* Jovian stratospheric hazes: The high phase view from Galileo // *Icarus*.—1999.—**139**, N 2.—P. 211—226.
40. *Saton T., Kawabata K.* Methane band photometry of the faded south equatorial band of Jupiter // *Astrophys. J.*—1992.—**384**, N 1.—P. 298—304.
41. *Smith P. H.* The vertical structure of the Jovian atmosphere // *Icarus*.—1986.—**65**, N 2/3.—P. 264—279.
42. *Stoker C. R.* Vertical cloud structure of Jupiter's equatorial plumes // *Icarus*.—1985.—**64**.—P. 557—575.
43. *Tomasko M. G., Bevard B., Doose L., et al.* Measurements of methane absorption by the descent imager/spectral radiometer (DISR) during its descent through Titan's atmosphere // *Planet. and Space Sci.*—2008.—**56**, N 5.—P. 624—647.
44. *Tomasko M. G., West R. A., Castillo N. D.* Photometry and polarimetry of Jupiter at large phase angle. I. Analysis of imaging data of a prominent belt and a zone from Pioneer 10 // *Icarus*.—1978.—**33**, N 3.—P. 558—592.
45. *Weidenschilling S. J., Lewis J. S.* Atmospheric and cloud structures of the Jovian planets // *Icarus*.—1973.—**20**, N 4.—P. 465—476.
46. *West R. A., Tomasko M. G.* Spatially resolved methane band photometry of Jupiter. III. Cloud vertical structures for several axisymmetric bands and the Great Red Spot // *Icarus*.—1980.—**41**, N 2.—P. 278—292.
47. *Woodman J. H., Cohran W. D., Slavsky D. B.* Spatially resolved reflectivities of Jupiter during the 1976 opposition // *Icarus*.—1979.—**37**.—P. 73—83.

Статья поступила в редакцию 14.02.13