

УДК 523.4

**А. В. Мороженко, А. С. Овсак**

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины  
03680 Киев, ул. Академика Заболотного 27

**Зависимости аэрозольной составляющей  
оптической толщины и относительной концентрации  
метана от глубины в атмосферах планет-гигантов**

*Из анализа данных о спектральной зависимости геометрического альbedo дисков планет-гигантов определены изменения оптической толщины  $\tau_a$  аэрозольной составляющей и относительной концентрации метана (Уран, Нептун) с глубиной:  $\ln \tau_a = -0.720 + 1.507 \ln p$  (для  $-2.2085 \ln p - 1.0018$ ),  $\ln \tau_a = +1.225 + 1.160 \ln p$  (для  $-1.0018 \ln p - 0.0595$ ),  $\ln \tau_a = +2.318 + 0.192 \ln p$  (для  $-0.0595 \ln p$ ),  $\tau_a = 0.0027$  для Юпитера;  $\ln \tau_a = -0.846 + 1.598 \ln p$  (для  $-3.3619 \ln p - 2.0575$ ),  $\ln \tau_a = +1.238 + 1.342 \ln p$  (для  $-2.0575 \ln p - 1.2074$ ),  $\ln \tau_a = +2.379 + 0.722 \ln p$  (для  $-1.2074 \ln p - 0.6501$ ),  $\ln \tau_a = +2.781 + 0.326 \ln p$  (для  $0.6501 \ln p$ ),  $\tau_a = 0.0027$  для Сатурна;  $\ln \tau_a = -2.694 + 0.087 \ln p$  (для  $+0.3685 \ln p + 1.2314$ ),  $\ln \tau_a = -2.619 + 7.341 \ln p$  (для  $+1.2314 \ln p + 1.7556$ ),  $\ln \tau_a = +1.229 + 0.956 \ln p$  (для  $+1.7556 \ln p$ ) для Урана;  $\ln \tau_a = -1.861 + 1.248 \ln p$  (для  $+0.3204 \ln p + 0.9051$ ),  $\ln \tau_a = -1.131 + 0.347 \ln p$  (для  $+0.9051 \ln p$ ) для Нептуна; усредненной по глубине относительной концентрации метана:  $\ln \tau = -9.982 + 2.676 \ln p$  ( $0.3584 \ln p - 1.5445$ );  $\ln \tau = -9.738 + 2.561 \ln p$  ( $0.3237 \ln p - 1.6156$ ) и  $\tau = 0.00382$  ( $\ln p - 1.6156$ );  $0.00554$  ( $\ln p - 1.6156$ ) соответственно для Урана и Нептуна ( $p$  в барах).*

**ЗАЛЕЖНОСТІ АЕРОЗОЛЬНОЇ СКЛАДОВОЇ ОПТИЧНОЇ ТОВЩИНИ  
ТА ВІДНОСНОЇ КОНЦЕНТРАЦІЇ МЕТАНУ ВІД ГЛИБИНИ В  
АТМОСФЕРАХ ПЛАНЕТ-ГІГАНТІВ, Мороженко О. В., Овсак О. С. —**

З аналізу даних про спектральні значення геометричного альбедо дисків планет-гігантів визначено зміни оптичної товщини аерозольної складової  $\tau_a$  та відносної концентрації метану з глибиною:  $\ln \tau_a = -0.720 + 1.507 \ln p$  (для  $-2.2085 \leq \ln p \leq -1.0018$ ),  $\ln \tau_a = +1.225 + 1.160 \ln p$  (для  $-1.0018 \leq \ln p \leq -0.0595$ ),  $\ln \tau_a = +2.318 + 0.192 \ln p$  (для  $-0.0595 \leq \ln p$ ),  $\tau_a = 0.0027$  для Юпітера;  $\ln \tau_a = -0.846 + 1.598 \ln p$  (для  $-3.3619 \leq \ln p \leq -2.0575$ ),  $\ln \tau_a = +1.238 + 1.342 \ln p$  (для  $-2.0575 \leq \ln p \leq -1.2074$ ),  $\ln \tau_a = +2.379 + 0.722 \ln p$  (для  $-1.2074 \leq \ln p \leq -0.6501$ ),  $\ln \tau_a = +2.781 + 0.326 \ln p$  (для  $0.6501 \leq \ln p$ ),  $\tau_a = 0.0027$  для Сатурна;  $\ln \tau_a = -2.694 + 0.087 \ln p$  (для  $+0.3685 \leq \ln p \leq +1.2314$ ),  $\ln \tau_a = -2.619 + 7.341 \ln p$  (для  $+1.2314 \leq \ln p \leq +1.7556$ ),  $\ln \tau_a = +1.229 + 0.956 \ln p$  (для  $+1.7556 \leq \ln p$ ) для Урана;  $\ln \tau_a = -1.861 + 1.248 \ln p$  (для  $+0.3204 \leq \ln p \leq +0.9051$ ),  $\ln \tau_a = -1.131 + 0.347 \ln p$  (для  $+0.9051 \leq \ln p$ ) для Нептуна; усередненої по глибині концентрації метану:  $\ln \tau = -9.982 + 2.676 \ln p$  ( $0.3584 \leq \ln p \leq 1.5445$ );  $\ln \tau = -9.738 + 2.561 \ln p$  ( $0.3237 \leq \ln p \leq 1.6156$ ) і  $\tau = 0.00382$  ( $\ln p \leq 1.6156$ );  $0.00554$  ( $\ln p \leq 1.6156$ ) відповідно для Урана і Нептуна ( $p$  в барах).

*CHANGES OF AEROSOL OPTICAL DEPTH AND OF RELATIVE CONCENTRATION OF METHANE WITH ALTITUDE IN THE ATMOSPHERES OF GIANT PLANETS, by Morozhenko A.V., Ovsak A. S. — From the analysis of data on spectral dependence of geometric albedo, we determined the changes of the aerosol optical depth  $\tau_a$  and relative concentration of methane with atmospheric pressure:  $\ln \tau_a = -0.720 + 1.507 \ln p$  ( $-2.2085 \leq \ln p \leq -1.0018$ ),  $\ln \tau_a = +1.225 + 1.160 \ln p$  ( $-1.0018 \leq \ln p \leq -0.0595$ ),  $\ln \tau_a = +2.318 + 0.192 \ln p$  ( $-0.0595 \leq \ln p$ ),  $\tau_a = 0.0027$  for Jupiter;  $\ln \tau_a = -0.846 + 1.598 \ln p$  ( $-3.3619 \leq \ln p \leq -2.0575$ ),  $\ln \tau_a = +1.238 + 1.342 \ln p$  ( $-2.0575 \leq \ln p \leq -1.2074$ ),  $\ln \tau_a = +2.379 + 0.722 \ln p$  ( $-1.2074 \leq \ln p \leq -0.6501$ ),  $\ln \tau_a = +2.781 + 0.326 \ln p$  ( $0.6501 \leq \ln p$ ),  $\tau_a = 0.0027$  for Saturn;  $\ln \tau_a = -2.694 + 0.087 \ln p$  ( $+0.3685 \leq \ln p \leq +1.2314$ ),  $\ln \tau_a = -2.619 + 7.341 \ln p$  ( $+1.2314 \leq \ln p \leq +1.7556$ ),  $\ln \tau_a = +1.229 + 0.956 \ln p$  ( $+1.7556 \leq \ln p$ ) for Uranus;  $\ln \tau_a = -1.861 + 1.248 \ln p$  ( $+0.3204 \leq \ln p \leq +0.9051$ ),  $\ln \tau_a = -1.131 + 0.347 \ln p$  ( $+0.9051 \leq \ln p$ ) for Neptune; average values of the relative concentrations of methane:  $\ln \tau = -9.982 + 2.676 \ln p$  ( $0.3584 \leq \ln p \leq 1.5445$ );  $\ln \tau = -9.738 + 2.561 \ln p$  ( $0.3237 \leq \ln p \leq 1.6156$ ),  $\tau = 0.00382$  ( $\ln p \leq 1.6156$ ) and  $0.00554$  ( $\ln p \leq 1.6156$ ) for Uranus and Neptune, respectively, ( $p$  in bars).*

## ВВЕДЕНИЕ

В атмосферах всех планет в том или ином количестве находится аэрозоль, оптические и физические свойства которого безусловно имеют сложную вертикальную структуру, наиболее достоверные данные о чем можно получить только с помощью экспериментов на проходящих сквозь этот слой зондах. Сейчас такие эксперименты осуществлены на Венере [7, 24, 25] и Юпитере [31]. Что касается других планет, то природа и структура аэрозольных слоев изучается на основе анализа спектрофотометрических и поляриметрических измерений (подробную подборку результатов этих работ см. в монографии [18]). При этом только для планет с оптически тонкими атмосферами (Марс) определялись значения оптической толщины облачного слоя  $\tau_a$ , а для планет с оптически толстыми атмосферами используются модели оптически однородных атмосфер с полубесконечным значением полной оптической толщины  $\tau_0$  и оценивается, как правило, отношение

$$\tau_0 / (\tau_R + \tau_a) = \tau_R / (\tau_R + \tau_a), \quad (1)$$

где  $\tau_R$  и  $\tau_a$  — объемные коэффициенты рассеяния газовой и аэрозольной составляющих атмосферы. Иногда анализ ведется в предположении, что в газовой атмосфере на определенных глубинах находится несколько оптически однородных аэрозольных слоев. Путем варьирования значений их параметров добиваются наилучшего согласия расчетов с наблюдениями [30], на основе чего и делаются выводы о структуре и оптических свойствах облачного слоя. Очевидно, что в этом случае не приходится говорить об однозначности полученных результатов. В то же время еще в начале 1980-х гг. была предпринята попытка на основе анализа спектрофотометрических наблюдений Юпитера в полосах поглощения метана различной мощности восстановить закономерность изменения оптической толщины аэрозольной составляющей с глубиной [8, 9]. Напомним, что этот метод был предложен Дж. Чемберленом [21] еще в первой половине 1960-х гг. Идея метода базируется на том, что при взаимодействии светового кванта с газовой-аэрозольной средой планетной атмосферы с очень большим значением оптической толщины реальную возможность выхода из среды имеют только те кванты, которые достигли определенной оптической глубины  $\tau_{\text{эф}}$ . Для ее определения в модели изотропно рассеивающей атмосферы Дж. Чемберлен предложил выражение, которое для очень слабо поглощающей атмосферы упростилось к выражению

$$\tau_{\text{эф}} = [3(1 - \alpha)]^{-1}.$$

Здесь  $\alpha$  — альбедо однократного рассеяния. Несколько позже Э. Г. Яновичский [1] обобщил это выражение на случай анизотропно рассеивающей атмосферы, которым мы и пользуемся. Как видно, полосы поглощения различной мощности формируются на различных эффективных глубинах, что позволяет восстанавливать вертикальные структуры облачных слоев атмосфер планет.

Применение этого метода к планетам-гигантам [4, 5, 8—12, 17] показало, что наблюдается различный характер изменения  $\tau_{\text{эф}}$  с глубиной не только для различных планет, но и для различных деталей диска (например, зон и полос на диске Юпитера). Отметим, что в этих работах использовались модели изотермической атмосферы, а значения коэффициентов поглощения метана  $k$  для различных полос не учитывали возможного их изменения с температурой. В действительности температуры изменяются с глубиной в атмосфере, а коэффициент поглощения метана зависит от температуры. Поэтому в работе [13] на основе анализа результатов измерения коэффициента поглощения в полосе метана на  $\lambda = 619$  нм в пределах изменения температуры от 100 до 290 К [32] было предложено аппроксимировать зависимости  $k(T)$  выражением

$$k(T) = k(T_0)(T/T_0)^n.$$

Значения параметра  $n$  оказались примерно равными +0.72 для центра полосы и -0.7 для крыльев. Это позволило в дальнейшем [14, 15, 16] при анализе наблюдательных данных значение коэффициентов поглощения для центров полос исправлять за температурный профиль с помощью поправок, вычисляемых как

$$\ln k(p) = \ln \frac{p_i T_0}{p_0 T_i} \frac{295}{T_i}^n - \ln \frac{p_i T_0}{p_0 T_i} \quad (2)$$

где  $p_0$  и  $T_0$  — значения давления и температуры для некоторого нулевого уровня в верхних слоях атмосферы. Принималось, что  $p_0 = 0.001$  бар,  $T_0 = 169.1$  К (Юпитер);  $0.00056$  бар,  $143.0$  К (Сатурн);  $0.00050$  бар,  $129.0$  К (Уран) и  $0.00035$  бар,  $130.6$  К (Нептун). Поскольку в работе [26] приведены значения температуры до ограниченных значений давления, то для более глубоких слоев атмосфер использовались линейные аппроксимации со значениями  $T = 59.8$  К (Юпитер),  $44.3$  К (Сатурн),  $31.3$  К (Уран) и  $36.0$  К (Нептун) на  $\ln p = 1$ . Изменения этих поправок с глубиной в атмосферах Юпитера и Сатурна показаны на рис. 1 в работе [16], а Урана и Нептуна — на рис. 2 в работе [15]. Поскольку в этом методе оценка давления на глубине эффективного формирования диффузно-отраженного излучения зависит от относительной концентрации метана, то при анализе данных для Юпитера и Сатурна уточнялось его значение, а для Урана и Нептуна определялся еще и характер изменения  $\tau_{\text{эф}}$  с глубиной.

Сейчас вкратце напомним результаты работ [15, 16] и причины, которые вынудили нас провести повторный анализ. Для Юпитера и Сатурна зависимости оптической толщины аэрозоля от глубины оказались подобными, а именно: сначала наблюдается резкое увеличение  $\tau_a$  с глубиной, которое становится менее выраженным в более глубоких слоях атмосферы, а ниже глубин с давлениями 7.22 бар для Юпитера и 2.61 бар для Сатурна аэрозольная составляющая полнос-

тью отсутствует. Отметим, что при первоначально принятой относительной концентрации метана 0.0021 [29] перелом в зависимости  $a(p)$  приходился на уровень 0.84 бар, тогда как по данным измерений зонда КА «Галилео» [31] в экваториальной зоне максимальное значение коэффициента рассеяния указывает на уровень 1.25 бар. Если значение атмосферного давления для уровня с максимальным коэффициентом рассеяния одинаково для всего диска планеты, то упомянутое различие давлений может быть приписано ошибочному значению  $a$ . Оказалось, что уровню с давлением 1.25 бар должно соответствовать значение  $a = 0.00125$ , которое использовалось при анализе данных для Юпитера и Сатурна. Для Урана и Нептуна были получены: наиболее вероятное значение среднего геометрического размера частиц 0.57 мкм (при дисперсии размеров 0.1 в нормально-логарифмическом законе распределения частиц по размерам и значении действительной части показателя преломления 1.33); оптическая толщина аэрозольной составляющей в верхних слоях атмосферы  $a = 0.08$  для Урана и 0.331 для Нептуна (на длине волны  $\lambda = 887.2$  нм), был определен характер изменения относительной концентрации метана с глубиной в пределах всех глубин формирования интенсивности диффузно отраженного излучения.

Однако есть ряд причин, вынуждающих нас вернуться к пересмотру результатов [15, 16].

1. Нам кажется маловероятным, что в нижних слоях атмосфер Юпитера и Сатурна полностью отсутствует аэрозоль.

2. Наличие оптически тонкого аэрозольного слоя только в верхних слоях атмосферы Урана противоречит данным рис. 1,  $a$  в работе [15], на котором показана графическая зависимость полученных для полос поглощения на различных длинах волн значений  $\ln a$  от  $\ln NL$  ( $NL$  — количество метана в км-амагат на луче зрения). В предположении, что спектральная зависимость  $a$  описывается выражением

$$a(\lambda) = a(\lambda_0) \left( \frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^n \quad (\lambda = 887.2 \text{ нм}),$$

минимальный разброс точек на этом рисунке имел место после исправления полученных значений оптической толщины с помощью этого выражения при  $n = -3.6 \dots -3.9$  для верхних слоев атмосферы и  $-2.8$  для глубоких. Это указывает на наличие в глубоких слоях атмосферы довольно мощного облачного слоя. Напомним, что для чисто газовой атмосферы  $n = -4$ .

3. Несмотря на то, что по разным оценкам (см. [18], с. 549 и 564) значение относительной концентрации метана лежит в пределах от  $10^{-7}$  до  $10^{-1}$ , нам все же кажется маловероятным, что относительная концентрация метана в атмосферах Урана и Нептуна монотонно увеличивается с глубиной.

Это вынудило нас провести повторный анализ наблюдательных данных с целью уточнения вертикальных структур аэрозольных составляющих атмосфер, а также относительной концентрации метана.

При этом будем добиваться, чтобы:

1) на зависимостях  $\ln \tau_a$  от  $\ln NL$  или  $\ln p$  (приведенных к длине волны  $\lambda = 887.2$  нм) наблюдался минимальный разброс точек;

2) пересчитанные на комнатную температуру (295 К) значения  $k(T)$  для всех планет показывали минимальный разброс не только между собой, но и по сравнению с лабораторными оценками;

3) для Урана и Нептуна глубже некоторого уровня в атмосфере относительная концентрация метана была постоянной.

Поскольку в работе [16] подробно описан метод анализа, то здесь отметим только используемые предположения и последовательность операций.

### ПРЕДПОЛОЖЕНИЯ

1. Атмосферы планет представляют собой вертикально и горизонтально оптически однородные газовой-аэрозольные слои полубесконечной оптической толщины.

2. Облачные частицы являются сферами с нормально-логарифмическим законом распределения частиц по размерам, а их физические свойства, значения коэффициентов рассеяния  $\tau_a(\lambda)$  и первого коэффициента  $x_1(\lambda)$  в разложении индикатрисы рассеяния в ряд по полиномам Лежандра не изменяются с глубиной в атмосфере и известны. Для Юпитера действительная часть показателя преломления облачных частиц равна  $n_r = 1.36$  и не зависит от длины волны, среднее геометрическое значение размера частиц  $r_0$  равно 0.19 мкм, а дисперсия размера частиц  $\sigma^2 = 0.28$  [28]. Рассчитанные по этим параметрам спектральные значения  $\tau_a(\lambda)$  и  $x_1(\lambda)$  приведены соответственно в работах [6, 28]. Для Сатурна  $n_r = 1.42$ ,  $r_0 = 1$  мкм и  $\sigma^2 = 0.10$  [3], а спектральные значения  $\tau_a(\lambda)$  и  $x_1(\lambda)$  брались соответственно из работ [2, 3]. Для Урана и Нептуна, как уже упоминалось,  $n_r = 1.33$ ,  $r_0 = 0.57$  мкм и  $\sigma^2 = 0.10$ . Значения  $\tau_a(\lambda)$  для таких частиц брались из работы [19], а  $x_1(\lambda)$  рассчитывались по приведенным здесь спектральным значениям индикатрисы рассеяния.

3. В качестве модельных величин геометрического альбедо и эффективных оптических глубин использовались значения, рассчитанные А.Овсаком для двухчленной индикатрисы рассеяния Хенни — Гринштейна при значениях  $g_2 = -0.25$  и  $g_1 = 0.85$ ,  $a = 0.907$  ( $x_1 = 2.2431$ , Юпитер и Сатурн);  $g_1 = 0.25$ ,  $a = 0.5$  ( $x_1 = 0$ , Уран и Нептун). Полностью результаты этих расчетов не были опубликованы, но часть из них можно найти в работе [18, с. 206]. Так как оцениваемые значения оптической толщины рассеивательной составляющей существенно зависят от принятых в модельных расчетах величин коэффициента  $x_1$ , то исправление за его изменение (в том числе и вследствие влияния молекулярного рассеяния) велось

по усредненным для всех значений альbedo однократного рассеяния поправкам

$$\begin{aligned} \ln \tau_s &= 0.535 x_1, & 0 < x_1 < 1.2033, \\ \ln \tau_s &= 0.644 + (0.3184 + 0.6020 x_1) x_1, & 1.2033 < x_1 < 1.8300, \\ \ln \tau_s &= 1.080 + (1.0362 + 0.2066 x_1) x_1, & 1.8300 < x_1 < 2.2431, \\ \ln \tau_s &= 1.543 + 1.658 x_1, & 2.2431 < x_1. \end{aligned} \quad (3)$$

4. Относительные концентрации водорода и гелия соответственно равны 0.85 и 0.15.

5. Значения  $k$  для центров всех полос поглощения одинаково реагируют на изменение температуры, а значения  $k$  при комнатной температуре брались из работы Л. Гивера [22], которые для удобства обозначим как  $k^G$ .

Анализировались данные о спектральных зависимостях геометрического альbedo планет-гигантов, которые получил Э. Каркошка в 1993 г. [23] со спектральным разрешением 1 нм (в электронной версии приведены с шагом 0.4 нм).

#### ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОПЕРАЦИЙ

1. Как и в предыдущих работах [13—16], первоначально из сравнения наблюдаемых и рассчитанных значений геометрического альbedo для различных значений альbedo однократного рассеяния определялись величины  $\ln(\tau_s / \tau_s^G)$ ,  $\ln \tau_s$ ,  $\ln \tau_s^G$ , по которым рассчитывалось количество метана на луче зрения (в км-амагат)

$$\ln NL = \ln \tau_s - \ln k^G. \quad (4)$$

Поскольку определяемые величины  $\ln(\tau_s / \tau_s^G)$  характеризуют совместное влияние поглощения метана и непрерывного спектра (индексы  $i$  и  $j$ ), то в первую очередь необходимо определить и учесть последнее. В случае планет-гигантов эта проблема осложняется тем, что в видимом диапазоне длин волн практически везде есть поглощение метаном, а поэтому точно учесть поглощение в непрерывном спектре не представляется возможным. Поэтому здесь, как и в предыдущих наших работах, предполагалось, что спектральные значения  $\ln(\tau_s / \tau_s^G)$  удовлетворительно описываются выражениями

$$\begin{aligned} \ln(\tau_s / \tau_s^G) &= 9.104 - 5.716 \ln \lambda, & 474 \text{ нм (Юпитер)}, \\ \ln(\tau_s / \tau_s^G) &= -10.364 - 8.6 \ln \lambda, & 534.8 \text{ нм} \dots 585.6 \text{ нм (Сатурн)}, \\ \ln(\tau_s / \tau_s^G) &= -13.254 - 14 \ln \lambda, & 585.6 \text{ нм (Сатурн)}, \\ \ln(\tau_s / \tau_s^G) &= -11.942 - 8.486 \ln \lambda, & 420 \text{ нм (Уран)}, \\ \ln(\tau_s / \tau_s^G) &= -7.692 - 3.131 \ln \lambda, & 420 \text{ нм (Нептун)}. \end{aligned}$$

2. Для Юпитера и Сатурна принималось, что значения относительной концентрации метана не зависят от глубины в атмосфере, а значения оптической глубины газовой составляющей на луче зрения определялись из выражения

$$\ln I_R = \ln NL - \ln I_0 - 8.123. \quad (5)$$

Величина  $-8.123$  равна  $\ln I_R$  для принятой выше водородно-гелиевой смеси протяженностью 1 км-амагат на длине волны  $\lambda = 887.2$  нм.

Поскольку, как уже говорилось, для Урана и Нептуна имеются веские основания полагать, что величина относительной концентрации метана в верхних слоях атмосфер изменяется с глубиной, то при определении  $I_R$  это учитывалось изменением вида выражения (5)

$$\ln I_R = D \ln NL - \ln I_0 - 8.123, \quad (6)$$

где  $D < 1$ . Здесь  $I_0$  – относительная концентрация метана на уровне с  $\ln NL = 0$ . Величина атмосферного давления определялась как

$$\ln p = \ln A - \ln I_R. \quad (7)$$

Здесь  $A$  равно давлению, при котором  $I_R(887.2 \text{ нм}) = 1$  ( $\ln A = 4.465$  для Юпитера, 3.599 для Сатурна, 3.433 для Урана и 3.659 для Нептуна). Поскольку анализировались данные о спектральных значениях геометрического альбедо, то при вычислении величин  $A$  брались средние для полярного и экваториального значений силы тяжести на этих планетах [26].

3. При оценке по выражениям (5) и (6) количества метана на луче зрения первоначально используются коэффициенты поглощения метана, которые получены в лабораторных условиях при комнатной температуре. На следующем этапе по найденным с помощью выражения (6) значениям давления рассчитываются по выражению (2) поправки коэффициента поглощения за температурный профиль  $\ln k(p)$ , а затем уточняются значения  $NL$  (уже в км-атм),  $I_R$  и  $p$  и определяются новые поправки  $\ln k(p)$ . Такие итерации (как правило, не больше 5) проводились до тех пор, пока последующая и предыдущая оценки  $\ln NL$  отличались бы не больше, чем на несколько единиц в четвертом знаке после запятой.

4. По выражениям (5) и (6) в соответствии с найденными величинами  $\ln NL$  для центров всех полос поглощения рассчитывались значения  $I_R(\lambda)$ , что позволило определить спектральные значения аэрозольной составляющей. Это делалось методом подбора таких значений  $\lambda_a$ , при которых рассчитанные (с учетом поправок (3) за изменение индикатрисы рассеяния) значения  $\ln I_s$  совпадали бы с полученными по наблюдательным данным. При этом сначала по выражению (1) оценивалось значение параметра  $\lambda_s$ , с помощью которого в соответствии с выражением

$$x_1 = (1 - \lambda_s) x_1 \quad (8)$$



рассчитывалось усредненное для газовой-аэрозольной смеси значение коэффициента  $x_1$ , которое в конечном счете и использовалось при вычислении поправки (3).

5. Варьируя значения относительной концентрации метана (в случае Урана и Нептуна на уровне с  $\ln NL = 0$  и коэффициента  $D$ ), мы добивались, чтобы на зависимости значений  $\ln a$  (приведенных к длине волны  $\lambda = 887.2$  нм) от  $\ln NL$  или  $\ln p$  наблюдался бы минимальный разброс (табл. 1), а также чтобы пересчитанные на температуру 295 К значения коэффициентов поглощения  $k(T)$  для всех полос, которые были определены для моделей атмосфер с полученными закономерностями изменения  $a$  и  $k$  (для Урана и Нептуна) от давления, были близкими к  $k^G$  (табл. 2).

Для ряда коротковолновых полос поглощения метана в спектрах Урана и Нептуна, в основном из-за малости аэрозольной составляющей оптической толщины (по сравнению с газовой), значения  $a$  не были определены, поэтому для этих длин волн в табл. 1 прочерки. К сожалению, здесь мы не можем объективно оценить погрешности приведенных  $a$ , о чем более детально будет речь ниже.

Отметим, что в спектрах Юпитера полоса поглощения метана на длине волны  $\lambda = 989$  нм практически совпадает с полосой поглощения аммиака на  $\lambda = 980$  нм. Что касается полос поглощения на длинах волн

543, 576, 596, 666 и 683 нм, то их остаточные интенсивности в спектрах Юпитера и Сатурна больше 0.95, а в спектрах Урана и Нептуна — меньше 0.75. Если учесть, что в работе [23] статистическая погрешность определения спектральных значений геометрического альбеда оценивается в 1 %, то, например, для Юпитера в полосе  $\lambda = 596$  нм при

**Таблица 1.** Изменения приведенных к длине волны  $\lambda = 887.2$  нм значений аэрозольных составляющих оптических толщин с глубиной

$\lambda$ , нм	Юпитер		Сатурн		Уран		Нептун	
	$p$ , бар	$a$	$p$ , бар	$a$	$p$ , бар	$a$	$p$ , бар	$a$
887.2	0.1010	0.487	0.0347	0.429	1.444	0.0679	1.378	0.1555
862.4	0.3649	3.359	0.1150	3.008	2.492	0.0710	2.413	0.3130
727.2	0.3672	3.404	0.1278	3.447	2.541	0.0715	2.472	0.3228
619.2	0.8458	8.956	0.2990	10.792	3.903	0.1896	3.948	0.3798
841.6	0.9882	8.595	0.2854	8.220	3.949	0.1053	3.913	0.3312
543.2	1.4613	11.040	0.4183	13.779	5.205	1.4865	5.593	—
702.4	1.8876	11.691	0.4932	16.137	4.912	1.0764	5.113	0.4284
4860	—	—	—	—	5.768	4.227	10.074	—
5760	4.2001	13.675	0.7512	17.992	8.083	4.705	9.564	0.5970
5960	8.6651	13.865	1.2344	21.272	9.741	5.620	11.815	—
4412	—	—	—	—	9.924	—	10.728	—
5100	—	—	—	—	10.820	5.743	13.055	—
4600	—	—	—	—	11.315	2.876	13.286	—
5220	—	—	—	—	20.697	6.254	27.849	—

**Таблица 2.** Значения пересчитанных на температуру 295 К  $k$  и использованных при анализе лабораторных  $k^G$  [22] ( $\text{см}^{-1}(\text{км-амагат})^{-1}$ )

$\lambda$ , нм	$k^{Ю}$	$k^C$	$k^V$	$k^H$	$k^G$
988.8	+2.602	+2.377	+2.257	+2.343	—
971.2	+1.754	+1.610	+1.834	+1.835	—
887.2	+3.440	+3.440	+3.440	+3.440	+3.440
862.4	+1.485	+1.461	+1.477	+1.477	+1.610
841.6	-0.016	-0.067	-0.100	-0.096	-0.219
797.2	+0.110	-0.015	+0.110	+0.165	—
727.0	+1.330	+1.330	+1.330	+1.330	+1.330
702.4	-1.351	-1.371	-1.331	-1.378	-1.320
682.4	-3.265	-3.340	-2.875	-3.139	—
666.4	-2.526	-2.507	-2.008	-2.229	—
619.2	-0.510	-0.510	-0.510	-0.510	-0.510
596.0	-3.418	-3.703	-3.722	-3.701	-3.721
576.0	-3.426	-3.322	-3.370	-3.373	-3.370
543.0	-2.099	-2.039	-2.082	-2.050	-2.100
522.0	—	—	-5.628	-5.329	-5.809
510.4	—	—	-4.443	-4.358	-4.500
485.6	—	—	-3.161	-3.258	-3.030
459.6	—	—	-5.054	-5.037	-5.190
441.2	—	—	-4.245	-4.449	-4.719

увеличении геометрического альbedo на 1 % величина  $k$  (295) уменьшится до  $-3.737$ , а при уменьшении на 1 % — увеличится до  $-3.123$ . Поэтому наблюдаемый для большинства полос поглощения разброс в пределах примерно 10 % можно считать вполне удовлетворительным, особенно если принять во внимание, что оценки  $k$  для центра полосы поглощения метана на  $619$  нм в лабораторных условиях [27] также достигает этой величины.

**РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА**

ЮПИТЕР. Так же, как и в предыдущей нашей работе [16], для относительной концентрации метана первоначально была взята величина  $\alpha = 0.0021$  [29], но условию минимального разброса значений аэрозольной составляющей на зависимости  $\ln \alpha$  от  $\ln p$  лучше соответствовало значение  $\alpha = 0.0027$ . Поэтому для дальнейшего анализа было принято именно это значение  $\alpha$ . По приведенным в табл. 1 значениям аэрозольной составляющей оптической толщины были получены следующие аппроксимации ее зависимости от давления:

$$\begin{aligned}
 \ln \alpha(p) &= -0.720 + 1.507 \ln p \quad (-2.2085 \leq \ln p \leq -1.0018), \\
 \ln \alpha(p) &= +1.225 + 1.160 \ln p \quad (-1.0018 \leq \ln p \leq -0.0595), \quad (9) \\
 \ln \alpha(p) &= +2.318 + 0.192 \ln p \quad (-0.0595 \leq \ln p).
 \end{aligned}$$

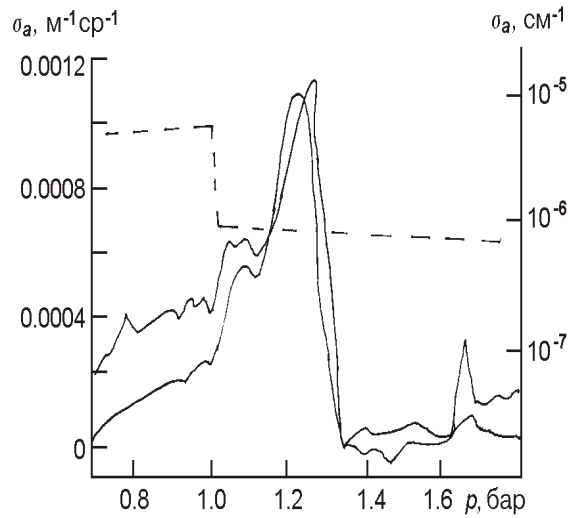


Рис. 1. Сравнение данных об изменении объемных коэффициентов рассеяния в атмосфере Юпитера: сплошные линии — КА «Галилео» (шкала ординат слева), штриховая — настоящая работа (шкала ординат справа)

Поскольку, как уже упоминалось, по нефелометрическим измерениям на зонде КА Галилео [31] (1995 г.) в экваториальной зоне Юпитера были получены данные об изменении коэффициента рассеяния с глубиной в пределах давлений примерно от 0.4 до 4.5 бар (фрагмент этих оценок показан на рис. 1), можно оценить хотя бы качественно правдоподобность наших результатов. Для этого по выражениям (9) были рассчитаны значения  $\sigma_a(p)$  (с шагом по давлению  $\ln p = 0.1$ ), что позволило рассчитать зависимости объемных коэффициентов рассеяния облачных частиц от глубины в атмосфере (рис. 2 (1)), которые для Юпитера в узком интервале атмосферного давления сравнены с результатами зонда КА «Галилео» (рис. 1, пунктир). Напомним, что нефелометрические измерения для каждого из пяти значений фазового угла, на которых велись измерения, давали различные значения коэффициента рассеяния. Поэтому на рис. 1 приведены данные для минимального и максимального значений  $\sigma_a$ . Если учесть, что наши данные характеризуют усредненную ситуацию по всему диску планеты, то мы склонны считать вполне удовлетворительными наши данные о характере вертикальной структуры облачного слоя. Различия положения нижней границы основного облачного слоя устраняется, если предположить, что относительная концентрация метана действительно равна 0.0021. Противоречие в значениях относительной концентрации метана может быть обусловлено рядом причин: во-первых, реальным изменением положения нижней границы облачного слоя в 1993 и 1995 гг.; во-вторых, усредненное для всего диска планеты положение нижней границы облачного слоя находится выше в атмосфере, чем в

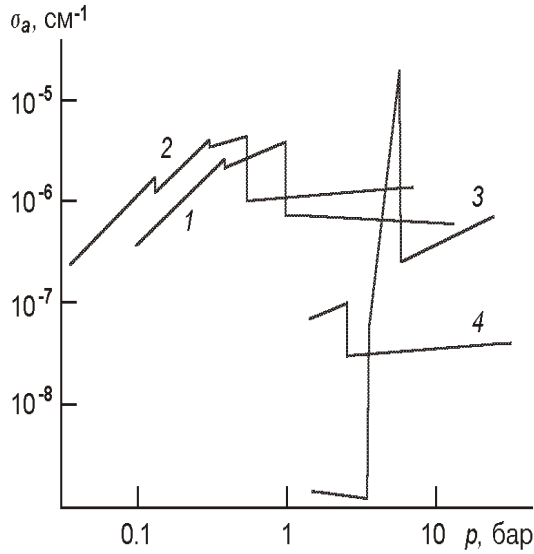


Рис. 2. Изменение объемного коэффициента рассеяния с глубиной в атмосферах Юпитера (1), Сатурна (2), Урана (3) и Нептуна (4)

месте вхождения зонда в атмосферу в экваториальной зоне; в-третьих, погрешностью самого метода эффективных глубин. Так, Э. Г. Яновицкий и А. С. Овсак [20] утверждают, что различие рассчитанных значений эффективной глубины и реальной может достигать 100 %.

САТУРН. Для Сатурна значение относительной концентрации метана также было принято равным 0.0027. Аппроксимация данных табл. 1 позволила получить следующий характер изменения аэрозольной составляющей оптической толщины с глубиной:

$$\begin{aligned} \ln a(p) &= -0.846 + 1.598 \ln p \quad (-3.3619 \ln p - 2.0575), \\ \ln a(p) &= +1.238 + 1.342 \ln p \quad (-2.0575 \ln p - 1.2074), \\ \ln a(p) &= +2.379 + 0.722 \ln p \quad (-1.2074 \ln p - 0.6501), \\ \ln a(p) &= +2.781 + 0.326 \ln p \quad (0.6501 \ln p). \end{aligned}$$

Зависимость объемного коэффициента рассеяния от атмосферного давления показана на рис. 2 (2).

УРАН. Наиболее вероятной зависимостью относительной концентрации метана от глубины является функция

$$\begin{aligned} \ln(p) &= -9.982 + 2.676 \ln p \quad (0.3584 \ln p - 1.5445), \\ &= 0.00382 \quad (\ln p - 1.6156). \end{aligned}$$

Выражение (6) будет иметь вид

$$\begin{aligned} \ln R &= 1.7253 - 0.272 \ln NL \quad \text{при} \quad -4.924 \ln NL - 0.60, \\ R &= 0.1513 + NL/12.863 \quad \text{при} \quad NL > 0.5488. \end{aligned}$$

Аппроксимация данных табл.1 дает

$$\ln a(p) = -2.694 + 0.087 \ln p \quad (+0.3685 \ln p + 1.2314),$$

$$\ln a(p) = -2.619 + 7.341 \ln p \quad (+1.2314 \ln p + 1.7556),$$

$$\ln a(p) = +1.229 + 0.956 \ln p \quad (+1.7556 \ln p).$$

Изменение объемного коэффициента рассеяния с глубиной показано на рис. 2 (3).

НЕПТУН. Для Нептуна наиболее вероятной зависимостью относительной концентрации метана с глубиной является функция

$$\begin{aligned} \ln(p) &= -9.738 + 2.561 \ln p \quad (0.3237 \ln p - 1.6156), \\ &= 0.00554 \quad (\ln p - 1.6156), \end{aligned}$$

а выражение (6) будет иметь вид

$$\begin{aligned} \ln R &= 1.945 - 0.281 \ln NL \quad \text{при } -4.951 \ln NL - 0.35, \\ R &= 0.1296 + NL/18.675 \quad \text{при } NL = 0.7047. \end{aligned}$$

Аппроксимация данных табл. 1 дает зависимости

$$\ln a(p) = -1.861 + 1.248 \ln p \quad (+0.3204 \ln p + 0.9051),$$

$$\ln a(p) = -1.131 + 0.347 \ln p \quad (+0.9051 \ln p).$$

Изменения объемного коэффициента рассеяния с глубиной показаны на рис. 2 (4).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как видно, метод, который базируется на оценке значений эффективных оптических глубин формирования интенсивности в оптически толстом газовой-аэрозольном слое, позволяет получать данные о вертикальной структуре облачного слоя и относительной концентрации метана, т. е. ту информацию, которую при традиционном анализе наблюдательных данных в принципе получить невозможно. Безусловно, эти данные, как и все решения обратных задач, не могут претендовать на однозначность и содержат трудно определяемые погрешности, которые обусловлены следующими обстоятельствами.

1. Практически все предположения, в которых велся анализ, в действительности могут не соответствовать реальности. Особенно это касается предположения о горизонтальной и вертикальной оптической однородности, потому что на изображениях планет отчетливо видны как параллельные экватору светлые (зоны) и темные полосы, так и отдельные облачные образования. Поэтому приведенные на рис. 2 зависимости объемных коэффициентов рассеяния от атмосферных давлений и значения давлений, на которых имеют место скачкообразные изменения  $a$ , являются собой некую усредненную по диску картину, которая не может соответствовать аналогичным зависимостям для конкретной облачной детали на диске планеты.

2. Трудности определения спектральных значений поглощения в непрерывном спектре, что особенно сильно влияет на результаты анализа данных для слабых полос поглощения.

3. Приближенный учет изменения рассеивательной составляющей оптической толщины с изменением вида индикатрисы рассеяния.

4. Из-за того, что различные точки в контурах полос поглощения по-разному реагируют на изменение температуры, не представляется возможным анализировать спектральную зависимость геометрического альбеда (отражательной способности деталей) в контурах полос поглощения, а поэтому невозможно восстановить детальную вертикальную структуру аэрозольного слоя.

5. Не исключено, что не вполне корректным является выражение, по которому рассчитывались эффективные оптические глубины [20].

6. Ошибки наблюдательных данных, особенно для очень слабых полос поглощения.

Несмотря на сказанное, указанный метод позволяет приближенно восстанавливать вертикальную структуру облачных слоев планет-гигантов, а получаемые с его помощью результаты могут помочь в выборе вероятных причин временных изменений спектрофотометрических свойств планет.

1. Аврамчук В. В., Бугаенко Л. А., Морозенко 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. Бугаенко О. И. Обобщенные сферические функции в задаче Ми // Физика атмосферы и океана.—1976.—12, № 6.—С. 603—611.
3. Бугаенко О. И., Длугач Ж. М., Морозенко А. В., Яновицкий Э. Г. Об оптических свойствах облачного слоя Сатурна в видимом диапазоне длин волн // Астрон. вестник.—1975.—9, № 1.—С. 13—21.
4. Дементьев М. С., Морозенко А. В. О вертикальной неоднородности атмосфер Урана и Нептуна // Астрон. вестник.—1990.—24, № 2.—С. 127—134.
5. Дементьев М. С., Морозенко А. В. Зоны и полосы диска Юпитера. Различие в вертикальной структуре облачных слоев // Астрон. вестник.—1990.—24, № 4.—С. 275—287.
6. Длугач Ж. М. Разложение индикатрисы рассеяния в ряд по полиномам Лежандра // Кинематика и физика небес. тел.—1985.—1, № 6.—С. 16—23.
7. Маров М. Я., Бывшев Б. В., Мануйлов К. Н. и др. Нефелометрические измерения в атмосфере на станциях «Венера-9» и «Венера-10» // Космич. исслед.—1976.—14, № 5.—С. 729—734.
8. Морозенко А. В. О структуре облачного слоя Юпитера // Письма в Астрон. журн.—1984.—10, № 10.—С. 775—779.
9. Морозенко А. В. Вертикальная структура широтных облачных поясов Юпитера // Астрон. вестник.—1985.—19, № 1.—С. 64—76.
10. Морозенко А. В. Проблемы изучения вертикальной структуры облачных слоев атмосфер планет-гигантов // Кинематика и физика небес. тел.—1993.—9, № 6.—С. 3—26.
11. Морозенко 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.
12. *Мороженко А. В.* Модель вертикальной структуры оптических параметров атмосферы Нептуна // Кинематика и физика небес. тел.—1999.—**15**, № 3.—С. 254—264.
  13. *Мороженко А. В.* Переопределение значений монохроматических коэффициентов поглощения метана с учетом тепловых режимов планет-гигантов. I. Полоса поглощения на  $\lambda = 619$  нм // Кинематика и физика небес. тел.—2002.— **18**, № 4.—С. 376—384.
  14. *Мороженко А. В.* Переопределение монохроматических коэффициентов поглощения метана с учетом тепловых режимов планет-гигантов. II. Юпитер // Кинематика и физика небес. тел.—2003.—**19**, № 6.—С. 483 – 500.
  15. *Мороженко А. В.* Переопределение монохроматических коэффициентов поглощения метана с учетом тепловых режимов планет-гигантов. III. Уран и Нептун // Кинематика и физика небес. тел.—2006.—**22**, № 2.—С. 138—153.
  16. *Мороженко А. В.* Переопределение 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.
  17. *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.
  18. *Мороженко О. В.* Методи і результати дистанційного зондування планетних атмосфер. — Київ: Наук. думка, 2004.—647 с.
  19. *Яновицкий Э. Г., Думанский З. О.* Таблицы по рассеянию света полидисперсной системой сферических частиц. — Киев: Наук. думка, 1972.—123 с.
  20. *Яновицкий Э. Г., Овсак А. С.* Эффективная оптическая глубина формирования линий поглощения в полубесконечной планетной атмосфере // Кинематика и физика небес. тел.—1997.—**13**, № 4.—С. 3—12.
  21. *Chamberlain J. W.* The atmosphere of Venus near cloud tops // *Astrophys. J.*—**141**, N 4.—P. 1184—1205.
  22. *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. Transfer.*—1978.—**19**, N 2.—P. 311—322.
  23. *Karkoshka E.* Spectrophotometry of the Jovian planets and Titan at 300 to 1000-nm wavelength: The methane spectrum // *Icarus.*—1994.—**111**, N 2.—P. 174—192.
  24. *Knollenberg R. G., Hunten D. M.* The microphysics of the clouds of Venus: Results of the Pioneer Venus particle size spectrometer experiment // *J. Geophys. Res.*—1980.—**85A**, N 13.— P. 8039—8058.
  25. *Knollenberg R. G., Trsvis L., Tomasko M., et al.* The clouds of Venus: A Synthesis report // *J. Geophys. Res.*—1980.—**85A**, N 13.—P. 8059—8088.
  26. *Lindal G. F.* The atmosphere of Neptune: An analysis of radio occultation data acquired with Voyager 2 // *Astron. J.*—1992.—**103**, N 3.—P. 967—982.
  27. *Mickelson M. E., Larson L. E., Schubert A.* New measurements of the 6190-Å band of methane // *J. Geophys. Res.*—1991.—**96E**, N 2.—P. 17507—17512.
  28. *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.

29. Niemann H. B., Atreya S. K., Carignam G. R., et al. The composition of the Jovian atmosphere as determined by the Galileo probe mass spectrometer // J. Geophys. Res.—1998.—**103E**, N 10.—P. 22831—22845.
30. 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.
31. Ragent B., Colburn D. S., Rages K. A., et al. The clouds of Jupiter: Results of the Galileo Jupiter mission probe Nephelometer experiment // J. Geophys. Res.—1998.—**103E**, N 10.—P. 22891—22909.
32. Smith W. H., Conner Ch. P., Baines K. H. Absorption coefficient for the 6190 Å band between 290 and 100 K with application to Uranus' atmosphere // Icarus.—1990.—**85**, N 1.—P. 58—64.

Поступила в редакцию 03.10.08