

УДК 523.47-355

Н. М. Костогрыз

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

Вероятные причины долгопериодических изменений геометрического альbedo Урана

С помощью метода, разработанного нами ранее, по наблюдательным данным о спектральном значении геометрического альbedo за 1981, 1993 и 1995 гг. были определены спектральные значения отношений составляющих оптических толщин τ_a/τ_R и τ_κ/τ_S (где τ_a , τ_R — аэрозольная и газовая рассеивательные составляющие, $\tau_S = \tau_a + \tau_R$, τ_κ — поглощательная составляющая эффективной оптической глубины формирования интенсивности диффузно отраженного излучения). Значения этих отношений оказались разными в различные годы. Это обусловлено горизонтальной неоднородностью распределения аэрозольной составляющей по диску Урана.

ІМОВІРНІ ПРИЧИНИ ДОВГОПЕРІОДИЧНИХ ЗМІН ГЕОМЕТРИЧНО-ГО АЛЬБЕДО УРАНА, Костогрыз Н. М. — При допомозі методу, розробленого нами раніше, за спостережними даними про спектральні значення геометричного альbedo у 1981, 1993 і 1995 рр. були визначені спектральні значення відношень складових оптичних товщин τ_a/τ_R і τ_κ/τ_S (де τ_a , τ_R — аерозольна і газова розсіювальні складові, $\tau_S = \tau_a + \tau_R$, τ_κ — поглинальна складова ефективної оптичної глибини формування інтенсивності дифузно відбитого випромінювання). Значення цих відношень виявились різними для різних років. Це пов'язано з горизонтальною неоднорідністю розподілу аерозольної складової по диску Урана.

POSSIBLE REASONS OF LONG-PERIOD VARIATIONS OF URANUS GEOMETRIC ALBEDO, by Kostogryz N. M. — Using the method developed by ourselves and the observational data on Uranus geometric albedo in 1981, 1993, 1995, the spectral values of optical depth were obtained, namely, τ_a/τ_R and τ_κ/τ_S (where τ_a , τ_R are aerosol and gas components, $\tau_S = \tau_a + \tau_R$, and τ_κ is absorbing component of effective optical depth of the formation of the diffuse reflected radiation intensity). It is found that these ratios are different for 1981, 1993, and 1995 years. This effect can be due to the horizontal inhomogeneity of aerosol component of optical depth over the Uranus disk.

ВВЕДЕНИЕ

Среди планет-гигантов Уран выделяется своими уникальными свойствами: у него очень слабый внутренний источник теплового излучения, и ось вращения лежит почти в плоскости орбиты. Большой наклон оси способст-

вует тому, что за 84 орбитальных лет с Земли наблюдаются все аспекты Урана с планетоцентричными широтами центра от 0 до 90°.

Еще в 1963 г. Гаррис [1] заметил, что Уран не является статической планетой, и не исключал возможности малоамплитудных изменений его блеска. К тому времени были обнаружены короткопериодические (6—11 земных лет) и долгопериодические (42 земных года) изменения блеска Урана; первые приписывались изменениям солнечной активности и внутренним процессам на планете, а вторые — сжатости планеты и большим углом наклона оси ее вращения [9, 10].

В 1949 г. Харди и Гиклас [14] предложили программу фотоэлектрического определения блеска Урана и Нептуна в полосах U , B , V , I , R для изучения изменений солнечной постоянной, которая была продолжена в работах [19—21]. Было подтверждено наличие долгопериодических изменений блеска, которые нам более отчетливо проявляются на длине волны $\lambda = 551$ нм. В результате поисков причин этих изменений обнаружено, что блеск и показатель цвета зависят от значения планетоцентрической широты Земли.

В работах [13, 25] отмечены короткопериодические изменения блеска планеты — около одного земного года, т. е. подтверждено, что изменения отражательной способности зависят не только от положения оси вращения на орбите. О подобных изменениях в спектре Урана будем говорить ниже.

Наличие облаков в атмосфере Урана предполагалось еще в прошлом столетии, но веских доказательств тому не было. В 1972 г. Вэллас [29] рассчитал значение геометрического альbedo A_g в УФ-области спектра для модели чисто газовой атмосферы с учетом комбинационного рассеяния на молекулах водорода. Было показано, что комбинационное рассеяние снижает уровень континуума, а значит и геометрическое альbedo, до 20 %. Очевидно, что при корректном анализе спектрофотометрических наблюдений необходимо учитывать влияние комбинационного рассеяния.

В работах [2, 5] в рамках модели однородного полубесконечного газово-аэрозольного слоя предложено использовать наблюдательные данные об интенсивности деталей комбинационного рассеяния в спектрах планет-гигантов для определения относительного вклада аэрозольной составляющей атмосфер. Оказалось, что содержание аэрозоля в атмосфере Урана в 1961—1973 гг. было значительно меньшим, чем в 1981—1983 гг.

Отметим, что в работах [2, 5] рассматривалась модель изотермической атмосферы, тогда как реальные атмосферы планет-гигантов характеризуются довольно сложными температурными профилями [18]. Если в модели изотермической атмосферы относительное количество молекул водорода в орто- и парасостояниях не зависит от глубины в атмосфере, то в неизотермической атмосфере оно будет изменяться с глубиной. По этой причине интенсивность деталей комбинационного рассеяния будет зависеть от эффективной глубины формирования интенсивности диффузно отраженного излучения, и неучет последнего приведет к ошибочности оценок упомянутых выше отношений. В нашей работе [7] был предложен метод учета температурного профиля атмосферы при расчете эффектов комбинационного рассеяния. В рамках модельной задачи оценивалась степень искажения определяемых значений отношений τ_a/τ_R и τ_c/τ_S . В работе [4] по данным о спектральных значениях геометрического альbedo [15] и реальном температурном профиле [18] были оценены реальные значения этих отношений для атмосферы Урана. Отметим, что в работе [27] также была попытка учесть температурный профиль в рамках модели вертикальной неоднородности.

Ниже по этой методике определяются значения τ_a/τ_R и τ_c/τ_S для наблюдательных данных разных лет.

НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Для определения оптических параметров атмосферы Урана мы использовали спектральные наблюдательные данные [22] за 1981 г., а также [15] и [16] за 1993 и 1995 гг. В работе [22] приведены спектральные значения геометрического альbedo A_g Урана в диапазоне длин волн $\lambda = 350...1050$ нм со спектральным разрешением около 0.7 нм, полученные 17—18 мая 1981 г. на 2.1-м телескопе обсерватории МакДональд. При вычислении геометриче-

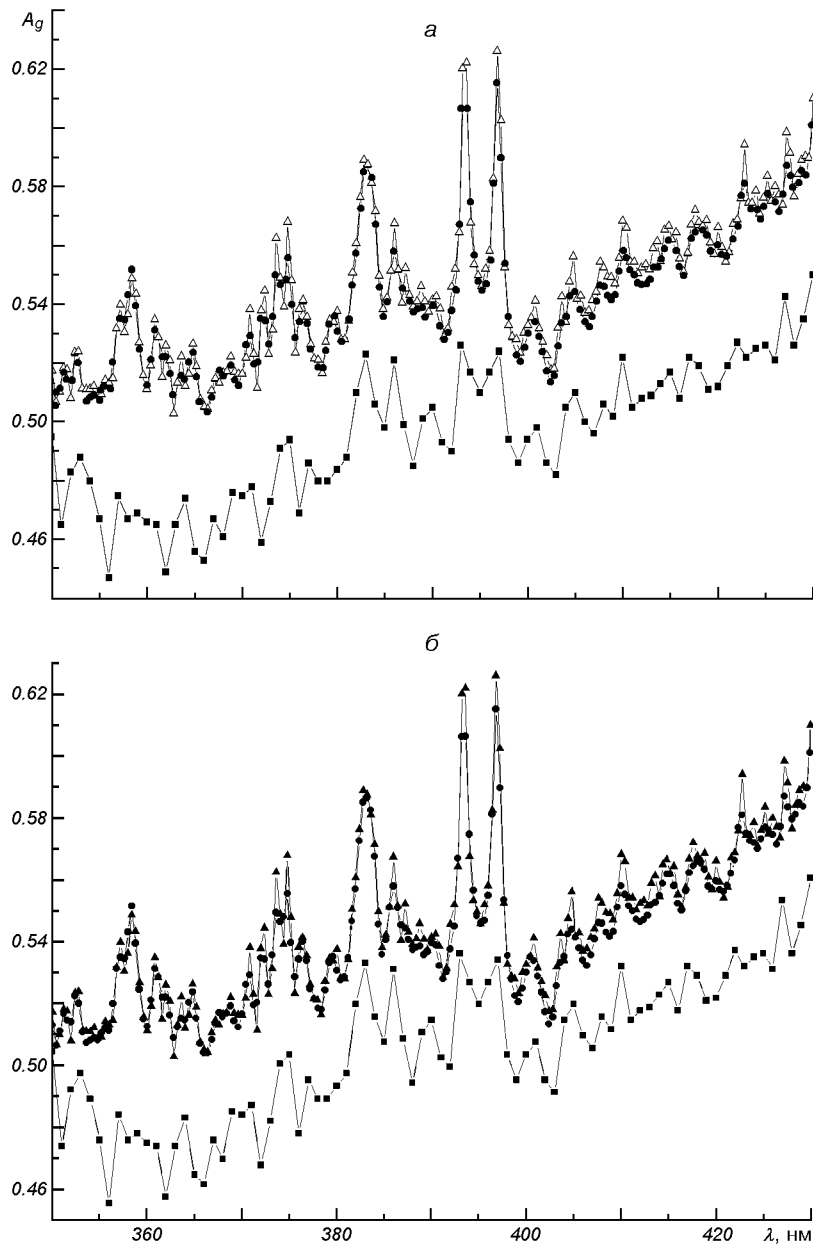


Рис. 1. Спектральные значения геометрического альbedo Урана (а) и те же данные, приведенные к единому радиусу планеты $R_0 = 25450$ км (б): квадратики — наблюдательные данные 1981 г. [22], точки — 1993 г. [15], треугольники — 1995 г. [16]su

ского альbedo значение радиуса Урана принималось равным $R_0 = 25700$ км. Систематические ошибки при вычислении A_g составляли около 5 %.

Наблюдательные данные [15] были получены в июне 1993 г. в диапазоне длин волн $\lambda\lambda = 300...1000$ нм со спектральным разрешением 1 нм на 1.52-м телескопе Южной Европейской обсерватории. В 1995 г. [16] спектральное разрешение в диапазоне $\lambda\lambda = 520...995$ нм составляло 0.4 нм. Погрешность определения A_g оценивается в 4 %. Радиус планеты принимался $R_0 = 25450$ км.

Полученные в работах [15, 16, 22] значения геометрического альbedo в диапазоне $\lambda\lambda = 350...430$ нм показаны на рис. 1, а.

Как видно, различия значений A_g достигают 10 %. Причинами этого могут быть как реальные изменения, так и погрешности при обработке данных (использование различных значений радиуса планеты и различных звезд сравнения). Мы можем частично исправить погрешности наблюдательных данных, допуская, что за сравнительно короткий период наблюдений наклон оси вращения планеты к плоскости орбиты и видимый радиус существенно не изменились. В результате данные работы [22] были пересчитаны нами на $R_0 = 25450$ км (рис. 1, б).

Для большей наглядности на рис. 2 приведены значения A_g для 1981 и 1995 гг., нормированные на значение для 1993 г. Кроме того, в табл. 1 приведены численные значения отношений для длин волн $\lambda\lambda$ 393 и 397 нм, т. е. в местах сильных фраунгоферовых линий *H* и *K* Ca II, где эффекты комбинационного рассеяния максимальны. Как видно из рис. 1, б и табл. 1,

Таблица 1. Относительные значения геометрического альbedo для длин волн $\lambda\lambda$ 393 и 397 нм

λ , нм	$A_g(1981)/A_g(1993)$	$A_g(1995)/A_g(1993)$
393	8 % ↓	2.5 % ↑
397	12 % ↓	2 % ↑

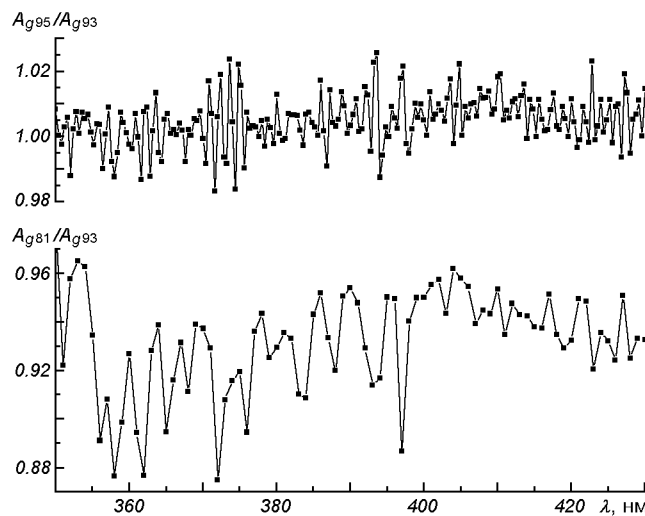


Рис. 2. Отношение значений геометрического альbedo в разные годы наблюдений к значению геометрического альbedo за 1993 г.

исправление данных [22] слабо повлияло на различия A_g . Вероятнее всего, эти различия обусловлены реальными изменениями физических свойств атмосферы планеты. Ниже мы попытаемся выяснить возможные причины этих изменений.

МОДЕЛЬ АТМОСФЕРЫ

Как и в предыдущих работах [2, 4–6], мы использовали модель однородного полубесконечного газово-аэрозольного слоя с относительными концентрациями водорода (85 %) и гелия (15 %). Здесь мы также учитывали реальный температурный профиль Урана [18].

При значениях температур, характерных для атмосферы Урана, большинство молекул находятся на нижних вращательных уровнях основного колебательного состояния. Поскольку в данном случае доминирует стоксовый компонент комбинационного рассеяния, то при анализе мы будем учитывать только его.

Вероятные значения давления на эффективных высотах формирования интенсивности диффузно отраженного излучения в коротковолновой области спектра взяты из работы А. В. Мороженко [6].

Переходы комбинационного рассеяния должны удовлетворять правилам отбора $\Delta J = -2; 0; 2$; соответствующие переходы называются $O(J)$, $Q(J)$ и $S(J)$. Переходы O и S отвечают за изменение вращательного и колебательного уровня энергии, а Q — за изменение только колебательного энергетического уровня. Поэтому комбинационное рассеяние рассматривается для четырех главных переходов водорода: вращательных $S(0)$, $S(1)$ и $O(2)$ и колебательного $Q_1(1)$. Значения коэффициентов рассеяния и величины комбинационного смещения на длине волны $\lambda = 400$ нм для этих переходов взяты из работы [11].

МЕТОДИКА ВЫЧИСЛЕНИЙ

Для учета эффектов комбинационного рассеяния используем модифицированное в работе [7] выражение для альбедо однократного рассеяния:

$$\omega = \frac{\tau_a/\tau_R + D}{1 + \tau_a/\tau_R + \tau_k/\tau_R},$$

где

$$D = 1 + 0.85 \frac{(N_0\tau_{s(0)} + N_2\tau_{o(2)})f_{\lambda_1} + N_1\tau_{s(1)}f_{\lambda_2} + \tau_{Q_1(1)}f_{\lambda_3}}{f_{\lambda_0}\tau_R} - 0.85 \frac{N_0\tau_{s(0)} + N_2\tau_{o(2)} + N_1\tau_{s(1)} + \tau_{Q_1(1)}}{\tau_R},$$

N_0 , N_1 , N_2 — количества молекул водорода в орто- и пара-состояниях; $\tau_{s(0)}$, $\tau_{s(1)}$, $\tau_{o(2)}$ и $\tau_{Q_1(1)}$ — оптические глубины комбинационного рассеяния молекулами, обусловленные соответственно вращательными ($j = 0, 1, 2$) и колебательным (Q) переходами; τ_R — оптическая глубина молекулярного рассеяния, f_{λ_i} — интенсивность солнечного излучения на длинах волн [12], с которых соответствующими переходами в процессе комбинационного рассеяния световой фотон перенесен на длину волны λ_0 .

Первоначально, сравнивая данные [15, 16, 22] со значениями $A_g(\lambda)$, рассчитанными О. Овсаком [8, с. 206] для полубесконечного однородного слоя, мы определили спектральные значения альбедо однократного рассея-

ния $\omega(\lambda)$. Эти расчеты выполнялись для двухпараметрической индикатрисы рассеяния, что дало возможность варьировать степень ее вытянутости вперед и назад. В данном случае использовались расчеты для индикатрисы рассеяния, при разложении которой в ряд по полиномам Лежандра значение первого коэффициента было равно нулю. Как говорилось выше, в неизотермической атмосфере значение D зависит от уровня эффективного формирования диффузно отраженного излучения в атмосфере. При расчете D_λ мы использовали приведенные в работе [6] приближенные значения эффективного давления $P_{эф}$ формирования этого излучения для диска Урана в спектральном диапазоне $\lambda\lambda = 376...439$ нм. Затем по выражению

$$\frac{1}{\omega} - 1 = \frac{1+a}{a+D} + \frac{b}{a+D} - 1 = \left(\frac{\tau_k}{\tau_S}\right)'$$

находились искаженные эффектом комбинационного рассеяния отношения $(\tau_k/\tau_S)'$. Здесь $a = \tau_a/\tau_R$, $b = \tau_k/\tau_R$. Очевидно, что при отсутствии комбинационного рассеяния значения отношения b будут монотонно изменяться с длиной волны (за исключением обусловленных погрешностями измерений случайными вариациями). Как легко убедиться, значения реального отношения τ_k/τ_S определяются выражением

$$\frac{\tau_k}{\tau_S} = \frac{(\tau_k/\tau_S)'_a(\lambda) + D/\omega_\lambda - 1}{1 + a(\lambda)}$$

Мы предположили, что в узком спектральном интервале ($\Delta\lambda = 10$ нм) значение a_λ слабо изменяется с длиной волны. Поэтому в первом приближении этим изменением мы пренебрегали. Затем, варьируя величину

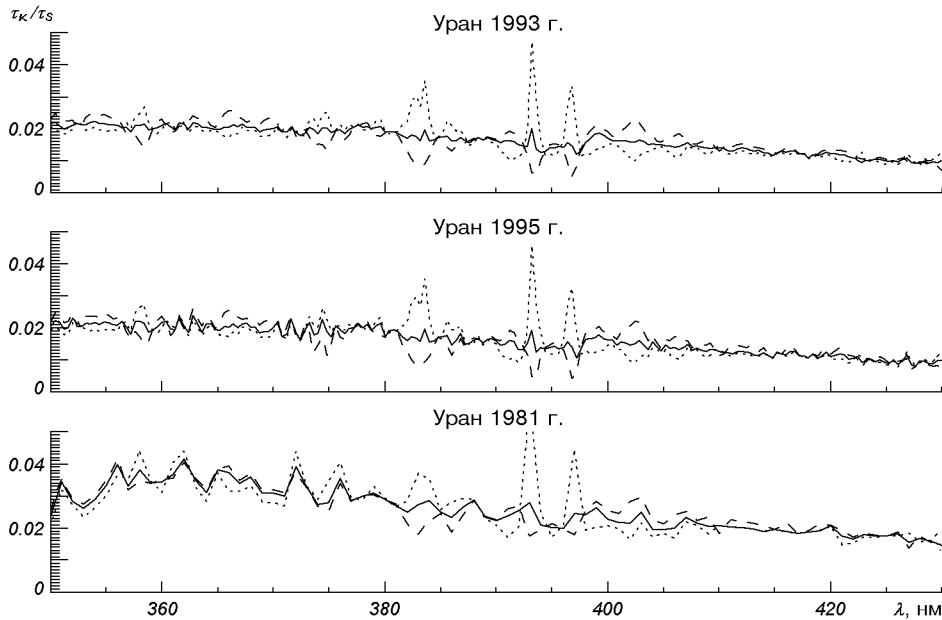


Рис. 3. Спектральная зависимость $(\tau_k/\tau_S)_\lambda$ в разные годы наблюдений: штриховая линия — значения $(\tau_k/\tau_S)'_\lambda$, полученные из наблюдений, точки — для чисто газовой атмосферы ($a = 0$), сплошная линия — спектральная зависимость $(\tau_k/\tau_S)_\lambda$ при значении $(a)_\lambda$

отношения a , мы добивались, чтобы для получаемых значений $(\tau_\kappa/\tau_S)_\lambda$ обеспечивался минимальный разброс в каждом из выбранных интервалах λ .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Итак, мы проанализировали значения геометрического альbedo Урана за разные годы наблюдений и получили значения a и $(\tau_\kappa/\tau_S)_\lambda$ (см. рис. 3 и табл. 2). Отметим, что погрешности геометрического альbedo в этой методике в основном влияют на значение отношения τ_κ/τ_S .

Как видно из табл. 2, значения a в разные годы наблюдений принимают разные значения и по-разному зависят от длины волны.

Обращает на себя внимание, что в интервалах $\Delta\lambda$, на которые приходятся сильные фраунгоферовы линии, значение отношения a значительно превышает те, в которых интенсивность фраунгоферовых линий значительно меньше. К сожалению, пока мы не можем указать причину этого. Не исключено, что это является следствием некорректности учета комбинационного рассеяния.

Наблюдаемые корреляции величин отношений a и τ_κ/τ_S (табл. 3) подтверждает предположение, что изменение спектральных значений геометрического альbedo во времени обусловлено изменением количества поглощающего аэрозоля в атмосфере планеты. В табл. 3 приведены также отношения геометрического альbedo A_g^Φ для фраунгоферовой линии К Са II и для ее дуба $A_g^{дyx}$ в разные годы. Поскольку с увеличением величины a эффект комбинационного рассеяния уменьшается, то наблюдаемые изменения отношения $A_g^\Phi/A_g^{дyx}$ качественно объясняется изменением аэрозольной составляющей атмосферы.

Проанализировав изменение a в разные годы наблюдений (табл. 2) и изменение положения Урана на орбите (рис. 4) нетрудно обнаружить, что

Таблица 2. Значения a , полученные при расчетах для каждого интервала длин волн

$\lambda\lambda$, нм	a		
	1993 г.	1995 г.	1981 г.
350—360	0.75758	0.93939	1.87879
360—370	0.57576	0.57576	3
370—380	0.75758	0.57576	3
380—390	1.42424	1.51515	1.06061
390—400	1.9697	1.84848	3
400—410	0.84848	0.84848	0.75758
410—420	0.78788	0.33333	0.0303
420—430	1.54545	0.87879	1.66667

Таблица 3. Значение a в диапазоне $\lambda\lambda = 390—399$ нм для разных спектральных наблюдательных данных, значения τ_κ/τ_S для длины волны $\lambda = 393$ нм, а также, отношение A_g^Φ для фраунгоферовой линии КСа II и ее дуба $A_g^{дyx}$

Год	a	τ_κ/τ_S ($\lambda = 393$ нм)
1981	3.00	0.028
1993	1.97	0.02
1995	1.85	0.019

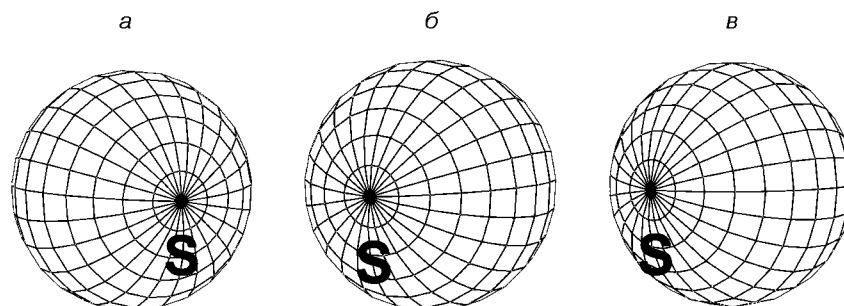


Рис. 4. Аспекты Урана в разные годы: *a* — ураноцентрическое склонение Земли равно -65° (1981 г.), *б* — -45° (1993 г.), *в* — -35° (1995 г.)

значение a уменьшается по мере уменьшения ураноцентрического склонения Земли (от -65° в 1981 г. до -35° в 1995 г.). Эту же закономерность подтверждают данные работ М. С. Дементьева [2, 3], согласно которым содержание аэрозоля в атмосфере Урана в 1961—1973 гг. было значительно ниже, чем в 1981—1983 гг. (ураноцентрическое склонение Земли составляло -22° в 1961 г. и около -65° в 1981 г.). Качественно эта закономерность объясняется результатами работ [17, 26, 28], согласно которым большинство облачных образований находятся в умеренных широтах.

ВЫВОДЫ

Итак, используя методику определения значений параметров атмосферы по данным о деталях комбинационного рассеяния, разработанную в работах [4, 7], мы получили спектральные значения τ_a/τ_R и τ_k/τ_S для модели неизотермической атмосферы.

По полученным данным можно заключить, что:

1) значения τ_a/τ_R и τ_k/τ_S изменяются со временем и зависят от горизонтальной неоднородности диска Урана;

2) вероятной причиной долгопериодических изменений геометрического альбеда Урана является неоднородное распределение аэрозоля в его атмосфере в зависимости от широты.

Автор признателна А. В. Мороженко и А. П. Видьмаченко за советы и полезное обсуждение.

1. Гаррис Д. Л. Интегральная фотометрия и колориметрия планет и спутников // Планеты и спутники. — М.: Изд-во иностр. лит., 1963.— С. 241—305.
2. Дементьев М. С. Оценка относительного содержания аэрозоля и радиуса частиц в атмосфере Урана // Кинематика и физика небес. тел.—1992.—8, № 2.—С. 25—35.
3. Дементьев М. С. Спектрофотометрические исследования атмосфер Урана и Нептуна: Дис. ... канд. физ.—мат. наук. — Киев, 1999.—220 с.—Машинопись.
4. Костогрыз Н. М. Комбинационное рассеяние в спектре атмосферы Урана с учетом ее неизотермичности // Кинематика и физика небес. тел.—2006.—22, № 4.—С. 254—259.
5. Мороженко А. В. Комбинационное рассеяние в атмосферах планет-гигантов и оптические свойства атмосферного аэрозоля // Кинематика и физика небес. тел.—1997.—6, № 4.—С. 22—33.
6. Мороженко О. В. Методи і результати дистанційного зондування планетних атмосфер. — Київ: Наук. думка, 2004.—646 с.
7. 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.

8. *Мороженко А. В., Костогрыз Н. М.* Особенности формирования деталей комбинационного рассеяния в неизотермической атмосфере // Кинематика и физика небес. тел.—2005.—**21**, № 2.—С. 114—120.
9. *Becker Von W.* Über Helligkeitsschwankungen der Planeten Mars, Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun und damit zusammenhangende Erscheinungen // Sonderausgabe aus den Sitzungsberichten der Preussischen Akademie der Wissenschaften. Phys.—mat. Klasse.—1933.—K1, 28.—23 S.
10. *Becker Von W.* Der physische Lichtwechsel der Planeten Saturn und Uranus // *Astron Nacher.*—1949.—277, N 1.—P. 65—72.
11. *Cochran W. D., Trafton L. M.* Raman scattering in the atmospheres of the major planets // *Astrophys. J.*—1978.—**219**, N 2.—P. 756—762.
12. *Delbouille L., Roland G., Neven L.* Photometric atlas of the solar spectrum from 3000 to 10000. — Liege: Univ. press, 1973.
13. *Hammel H. B., Lockwood G. W.* Long-term atmospheric variability on Uranus and Neptune // *Icarus.*—2007.—**186**, N 1.—P. 291—301.
14. *Hardie R. H., Giclas H. L.* A search for solar variation // *Astrophys. J.*—1955.—**122**, N 3.—P. 460—465.
15. *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.
16. *Karkoschka E.* Methane, ammonia, and temperature measurements of the Jovian planets and Titan from CCD-spectrophotometry // *Icarus.*—1998.—**133**, N 1.—P. 134—146.
17. *Karkoschka E.* Clouds of high contrast on Uranus // *Science.*—1998.—**280**, N 5363.—P. 570—572.
18. *Lindal G. F., Lyons J. R., Sweetman D. N., et al.* The atmosphere of Uranus: Results of radio measurements with Voyager 2 // *J. Geophys. Res.*—1987.—**A92**, N 3.—P. 14987—15001.
19. *Lockwood G. M.* Secular brightness increase of Titan, Uranus and Neptune // *Icarus.*—1977.—**32**, N 4.—P. 413—430.
20. *Lockwood G. M., Thompson D. T.* A photometric test of rotation periods for Uranus and time variations of methane-band strengths // *Icarus.*—1978.—**221**, N 2.—P. 689—693.
21. *Lockwood G. M., Thompson D. T.* Photometric variability of Uranus, 1972—1996 // *Icarus.*—1999.—**137**, N 1.—P. 2—12.
22. *Neff J. S., Humm D. C., Bergstralh J. T., et al.* Absolute Spectrophotometry of Titan, Uranus, and Neptune: 3500—10500 Å // *Icarus.*—1984.—**60**, N 2.—P. 221—235.
23. *Pollack J. B., Rages K., Baines K. H., et al.* Estimates of the bolometric albedos and radiation balance of Uranus and Neptune // *Icarus.*—1986.—**65**, N 2/3.—P. 442—466.
24. *Price M. J., Franz O. G.* Limb brightening on Uranus: The visible spectra II // *Icarus.*—1978.—**34**, N 2.—P. 355—373.
25. *Rages K. A., Hammel H. B., Friedson A. J.* Evidence for temporal change at Uranus' south pole // *Icarus.*—2004.—**172**, N 2.—P. 548—554.
26. *Smith B. A., Soderblom L., Beebe R., et al.* Voyager 2 in the Uranian system — Imaging science results // *Science.*—1986.—**233**, N 4759.—P. 43—64.
27. *Sromovsky L. A.* Accurate and approximate calculations of Raman scattering in the atmosphere of Neptune // *Icarus.*—2005.—**173**, N 1.—P. 254—283.
28. *Sromovsky L. A., Fry P. M.* Dynamics of cloud features on Uranus // *Icarus.*—2005.—**179**, N 2.—P. 459—484.
29. *Wallace L.* Rayleigh and Raman scattering by H₂ in a planetary atmosphere // *Astrophys. J.*—1972.—**176**, N 1.—P. 249—257.

Поступила в редакцию 22.01.07