ЛИНИИ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ В АТМОСФЕРАХ ПЛАНЕТ-ГИГАНТОВ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОСЛЕДНИХ

Н. М. Костогрыз, А. С. Овсак, А. В. Мороженко

© 2009

Главная астрономическая обсерватория НАН Украины
03680 Киев ГСП, ул. Академика Заболотного, 27
e-mail: kosn@mao.kiev.ua

Коротко представлены результаты авторов по определению параметров атмосфер планет-гигантов, которые базируются на анализе спектральных значений альбедо, в том числе и в местах проявления эффектов комбинационного рассеяния, а также расчете эффективной глубины формирования интенсивности диффузно отраженного излучения. Были получены: 1) значения отношений τ_a/τ_R и τ_κ/τ_S (где τ_a, τ_R, τ_κ – аэрозольная, релеевская и поглощающая составляющие оптической глубины и $\tau_S = \tau_a + \tau_R$) для атмосферы Урана в различные годы; 2) измерены τ_a и относительные концентрации метана с глубиной в атмосферах планет-гигантов.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, при рассеянии света на молекулах, кроме обычного релеевского рассеяния (без изменения частоты), имеет место и комбинационное (рамановское) рассеяние с увеличением (стоксовое рассеяние) и уменьшением (антистоксовое рассеяние) частоты.

На возможное проявление эффектов последнего в спектрах планет-гигантов впервые обратил внимание Брандт [10]. Он предсказал возможность появления слабого "духа" солнечной эмиссионной линии L_α, смещенного на 4161 см$^{-1}$ в длинноволновую область спектра. Однако первоначальные попытки его обнаружения оказались безрезультатными [11, 13]. К поискам комбинационного рассеяния в атмосферах планет-гигантов в начале 1970-х годов вернулись Белтон и др. [9], а более тщательно этот эффект исследовал Веллас [19]. Он показал, что учет только вращательного перехода ($J = 0 \to 2$) может привести к изменению отражательной способности на 10% в местах таких сильных фраунгоферовых линий, как H и K Ca II. Кроме того, в более длинноволновой области спектра на расстоянии 5.6 нм от этих линий возникнут слабые "духи" этих линий глубиной около 10%.

Кочран и Трафтон [12] выполнили более строгие расчеты коэффициентов комбинационного рассеяния различных газов, а также показали, что учет комбинационного рассеяния приводит к уменьшению геометрического альбедо для длин волн $\lambda < 500$ нм, а для больших длин волн – к незначительному увеличению.

В настоящее время имеется ряд наблюдательных данных, которые подтверждают наличие эффектов комбинационного рассеяния в спектрах планет-гигантов.

В большинстве работ, в которых анализировались данные об эффектах комбинационного рассеяния [9, 18, 19], оно учитывалось только при расчетах в модели чисто газовых атмосфер. Только Дементьев [1] попытался на основе анализа "духов" фраунгоферовых линий H и K Ca II близ $\lambda\lambda$ 398.9, 402.6 и 406.3 нм определить отношение $\beta = \sigma_g/(\sigma_g + \sigma_a)$, где σ_g и σ_a – объемные коэффициенты рассеяния газа и аэрозоля. Предполагалось, что облачные частицы являются чисто рассеивающими, а действительная часть их показателя преломления равна 1.33. Было получено, что $\beta = 0.98$–0.99 для периода наблюдений 1961–1973 гг. и 0.1–0.3 для 1981–1983 гг.

Позже Мороженко [5] показал, что, исходя только из наблюдаемых проявлений эффекта комбинационного рассеяния, можно определить некоторые характеристики газово-аэрозольной среды планет-гигантов.

В работах [1, 5] рассматривалась модель изотермической атмосферы, тогда как реальные атмосферы планет-гигантов характеризуются довольно сложными температурными профилями [16]. Если в первом случае 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. Мороженко и Костогрыз [6] предложили метод учета температурного профиля атмосферы при расчете эффектов комбинационного рассеяния и оценили степень искажения определяемых значений отношений τ_a/τ_R, а также поглощающей и рассеивающей составляющих оптической глубины τ_κ/τ_S. Исходя из этого, в работе [2] (по данным о спектральных значениях геометрического альбедо [14] и температурном профиле [16]) были оценены значения этих отношений для атмосферы Урана.

Позже Костогрыз [3] оценила отношения τ_a/τ_R, τ_κ/τ_S для разных наблюдательных данных, которые проводились в разные годы [15, 17]. Было показано, что на основе этих вычислений можно объяснить долгопериодические изменения геометрического альбедо Урана.

В настоящем докладе мы представляем результаты анализа эффектов комбинационного рассеяния в атмосферах планет-гигантов.

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ

Учет эффектов комбинационного рассеяния велся путем внесения соответствующей поправки в выражение для альбедо однократного рассеяния [18]. Поскольку здесь учитывались только фотоны, перенесенные комбинационным рассеянием на длину волны λ_0, то в работе Мороженко и Костогрыз [6] была предложена модификация выражения в виде:

$$\omega = \frac{\tau_a/\tau_R + D}{1 + \tau_\kappa/\tau_R}, \tag{1}$$

учитывающая и те фотоны, которые комбинационным рассеянием перенесены с длины волны λ_0.

Здесь

$$\begin{aligned} D \quad = \quad & 1 + 0.85 \cdot [((N_0\tau_{S(0)} + N_2\tau_{O(2)}f_{\lambda_1} + N_1\tau_{S(1)}f_{\lambda_2} + \tau_{Q_1(1)f_{\lambda_3}})/f_{\lambda_0}\tau_R] - \\ & - 0.85 \cdot (N_0\tau_{S(0)} + N_2\tau_{O(2)} + N_1\tau_{S(1)} + \tau_{Q_1(1)})/\tau_R, \end{aligned} \tag{2}$$

N_0, N_1, N_2 – количество молекул водорода в орто- и парасостояниях; $\tau_{S(0)}$, $\tau_{S(1)}$, $\tau_{O(2)}$, $\tau_{Q_1(1)}$ – оптические глубины комбинационного рассеяния молекулами, обусловленные вращательными ($j = 0, 1, 2$) и колебательным (Q) переходами; f_{λ_i} – интенсивность солнечного излучения на длинах волн, с которых световой фотон перенесен на λ_0 в процессе комбинационного рассеяния; τ_R – оптическая толщина релеевского рассеяния.

Из выражения (1) можно найти τ_a/τ_R и τ_κ/τ_S, где $\tau_S = \tau_a + \tau_R$. Детально этот метод описан в работах [2, 3].

После определения значения τ_a/τ_R, величина альбедо однократного рассеяния исправлялась за эффект комбинационного рассеяния, и оценивалось его истинное значение ω' для газово-аэрозольной среды с помощью выражения

$$\omega' = \frac{D + \tau_a/\tau_R}{(1 + \tau_a/\tau_R)\omega}. \tag{3}$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Как видно из таблицы 1 для Юпитера и Сатурна наблюдаемый эффект комбинационного рассеяния не превышает 4%, а для Урана и Нептуна – достигает почти 20%.

Как было отмечено, первоначально анализ наблюдательных данных об эффектах комбинационного рассеяния в спектрах планет-гигантов проводили в модели изотермической атмосферы. Было получено,

Таблица 1. Отношение геометрического альбедо на длинах волн фраунгоферовых линий и их “духов”, обусловленных вращательным переходом S(0), по наблюдательным данным [14]

λ, нм	Юпитер	Сатурн	Уран	Нептун
358.12	1.0303	1.0296	1.0647	1.0713
373.39	1.0126	1.0148	1.0578	1.0657
382.04	1.0245	1.0192	1.0911	1.1031
393.37	1.0352	1.0228	1.1286	1.1508
396.85	1.0379	1.0317	1.1718	1.1945

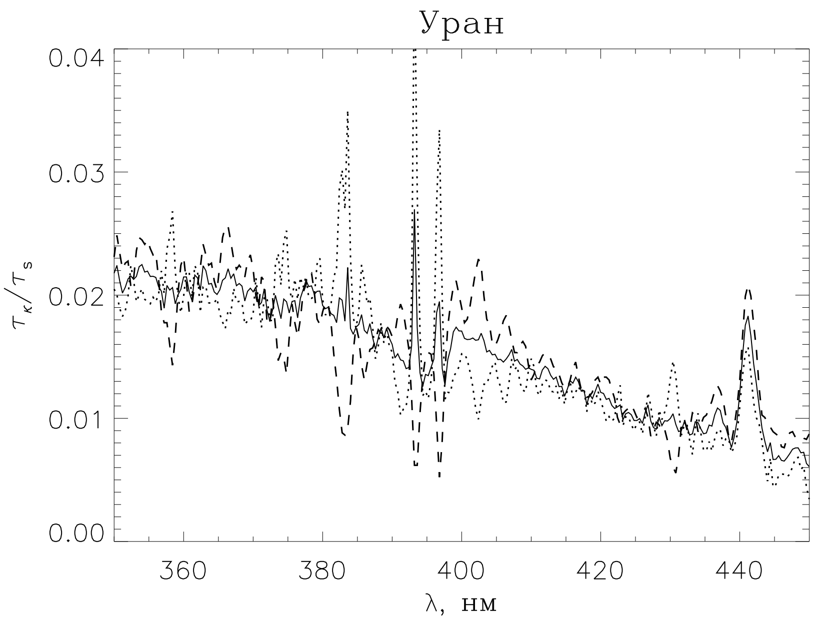

Рис. 1. Отношение поглощающей и рассеивающей составляющих оптической толщины газа и аэрозоля в зависимости от длины волны для неизотермической атмосферы Урана. Штриховая линия – наблюдательные данные, пунктир – расчеты для случая газовой атмосферы, сплошная линия – исправленное за эффект комбинационного рассеяния значение τ_κ/τ_S

что средние значения отношения τ_a/τ_R для Юпитера (20 ± 3) и для Сатурна (15 ± 2) находятся в удовлетворительном согласии с оценками, полученными другими методами. Так, например, в работе [8], в которой анализировалось распределение интенсивности полосы поглощения метана $\lambda\,727$ нм по диску, для величины β в облачном слое было получено 0.002 ± 0.001. Если предположить, что объемный коэффициент рассеяния аэрозоля не зависит от длины волны, то тогда на длине волны $\lambda\,397$ нм отношение τ_a/τ_R окажется равным 44 ± 22. Для Сатурна для разных широтных поясов значение этого отношения составляет 11–28 [4].

Для Урана и Нептуна при $x_1 = 2.49$ $\tau_a/\tau_R = 20.3 \pm 1.2$ и 24.6 ± 1.8, а при $x_1 = 0$ $\tau_a/\tau_R = 1.35 \pm 0.12$ и 1.61 ± 0.17 соответственно. Здесь x_1 – первый коэффициент разложения индикатрисы рассеяния в ряд по полиномам Лежандра.

Что касается анализа в модели неизотермической атмосферы, то он был выполнен только для Урана [2]. Было получено среднее значение $\tau_a/\tau_R = 0.96$, при котором наблюдается минимальный разброс рассчитанных значений τ_κ/τ_S. На рис. 1 приведено сравнение наблюдательных значений τ_κ/τ_S, которые определяются из выражения $\tau_\kappa/\tau_S = 1/\omega - 1$, значений, рассчитанных при условии чисто газовой атмосферы ($\tau_a/\tau_R = 0$) и при значении $\tau_a/\tau_R = 0.96$. Видно, что именно при $\tau_a/\tau_R = 0.96$ значение τ_κ/τ_S имеет минимальное отклонение в усредненном спектральном ходе этой величины.

Здесь также рассчитывались значения τ_κ/τ_S и τ_a/τ_R в предположении изотермической атмосферы с температурой 57.1 К. Полученное значение $\tau_a/\tau_R = 1.5$, т. е. приблизительно на 50% больше, чем значение, найденное для условия неизотермической атмосферы (рис. 2).

Известно, что эффект комбинационного рассеяния в атмосфере Урана приводит к уменьшению его геометрического альбедо и альбедо однократного рассеяния в коротковолновой области спектра, которое может трактоваться как псевдопоглощение в непрерывном спектре. Используя предложенную методику, мы рассчитали истинное значение альбедо однократного рассеяния и сравнили с полученными значениями непосредственно по наблюдательным данным для $A_g(\lambda)$ (рис. 3).

Проанализировав значения геометрического альбедо Урана в разные годы наблюдений [14, 15, 17], мы можем предположить, что изменение геометрического альбедо во времени обусловлено изменением количества аэрозоля в атмосфере планеты и изменением положения Урана на орбите (табл. 2). В этой же таблице также приведены отношения геометрического альбедо A_g^F для фраунгоферовой линии K Ca II и для ее “духа” A_g^G в разные годы. Поскольку с увеличением τ_a/τ_R эффект комбинационного рассеяния

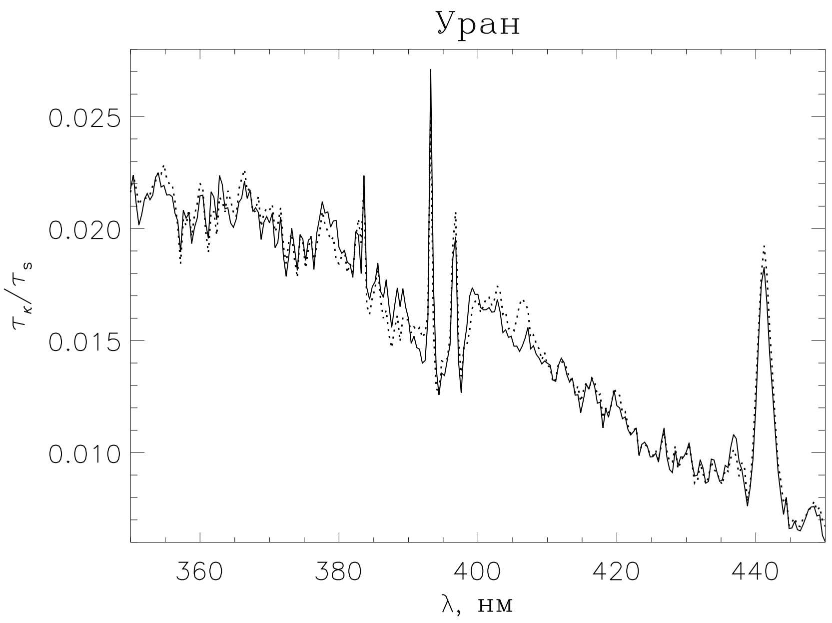

Рис. 2. Отношение поглощающей и рассеивающей составляющих оптической толщины газа и аэрозоля в зависимости от длины волны. Сплошная линия – для неизотермической атмосферы Урана при $\tau_a/\tau_R = 0.96$, пунктир – для изотермической атмосферы с эффективной температурой 57.1 К при $\tau_a/\tau_R = 1.5$

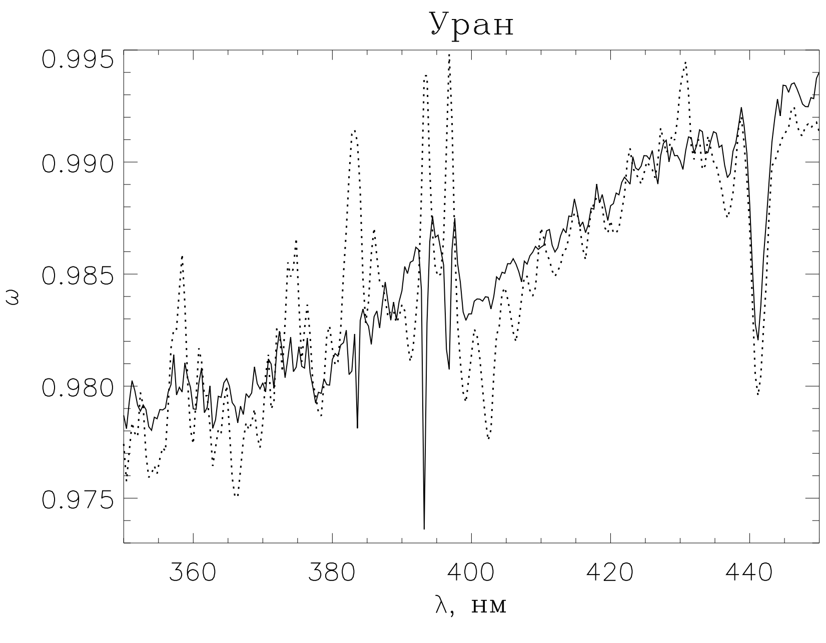

Рис. 3. Зависимость альбедо однократного рассеяния от длины волны для неизотермической атмосферы Урана: пунктир – наблюдательное значение альбедо однократного рассеяния, сплошная линия – истинное значение альбедо однократного рассеяния, исправленное за комбинационное рассеяние

Таблица 2. Значение τ_a/τ_R в диапазоне $\lambda\lambda = 390$–399 нм; τ_κ/τ_S для $\lambda = 393$ нм, а также отношение A_g^F/A_g^G для фраунгоферовой линии K Ca II и ее "духа"

Год	τ_a/τ_R	τ_κ/τ_S	A_g^F/A_g^G
1981	3.00	0.028	1.065
1993	1.97	0.020	1.165
1995	1.85	0.019	1.188

уменьшается, то наблюдаемые изменения отношения A_g^F/A_g^G качественно объясняются изменением аэрозольной составляющей атмосферы.

Проанализировав изменение τ_a/τ_R в разные годы и изменение положения Урана на орбите, нетрудно обнаружить, что значение τ_a/τ_R уменьшается по мере уменьшения ураноцентрического склонения Земли (от –65° в 1981 г. до –35° в 1995 г.). Эту же закономерность подтверждают данные из работы Дементьева [1], 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.)

Итак, анализ последствий комбинационного рассеяния в атмосферах планет-гигантов, а именно, значений геометрического альбедо в длинах волн, которые соответствуют фраунгоферовым линиям и их "духам", показал, что такой тип наблюдений может быть независимым методом оценки вероятного значения оптических толщин аэрозольной и газовой составляющей атмосферы, а также отношений поглощающей и рассеивающей составляющих оптических толщин аэрозоля.

Неучет температурного профиля Урана приводит к большим ошибкам (около 50%) в определении этих величин.

Значения τ_a/τ_R и τ_κ/τ_S изменяются со временем и зависят от горизонтальной неоднородности диска Урана.

Вероятной причиной долгопериодических изменений геометрического альбедо Урана является неоднородное распределение аэрозоля в его атмосфере в зависимости от широты.

Наконец, Мороженко и Овсак [7], основываясь на методе расчетов $\tau_{\text{эф}}$, определили характер изменения τ_a и относительной концентрации метана с глубиной в атмосферах планет-гигантов:

– для Юпитера:

$$\ln\tau_a(p) = -0.720 + 1.507\Delta\ln p, \qquad -2.2085 \le \ln p \le -1.0018,$$
$$\ln\tau_a(p) = 1.225 + 1.160\Delta\ln p, \qquad -1.0018 \le \ln p \le -0.0595,$$
$$\ln\tau_a(p) = 2.318 + 0.192\Delta\ln p, \qquad -0.0595 \le \ln p,$$

– для Сатурна:

$$\ln\tau_a(p) = -0.846 + 1.598\Delta\ln p, \qquad -3.3619 \le \ln p \le -2.0575,$$
$$\ln\tau_a(p) = 1.238 + 1.342\Delta\ln p, \qquad -2.0575 \le \ln p \le -1.2074,$$
$$\ln\tau_a(p) = 2.379 + 0.722\Delta\ln p, \qquad -1.2074 \le \ln p \le -0.6501,$$
$$\ln\tau_a(p) = 2.781 + 0.326\Delta\ln p, \qquad -0.6501 \le \ln p,$$

– для Урана:

$$\ln\tau_a(p) = -2.694 + 0.087\Delta\ln p, \qquad 0.3685 \le \ln p \le 1.2314,$$
$$\ln\tau_a(p) = -2.619 + 7.341\Delta\ln p, \qquad 1.2314 \le \ln p \le 1.7556,$$
$$\ln\tau_a(p) = 1.229 + 0.956\Delta\ln p, \qquad 1.7556 \le \ln p,$$

– для Нептуна:

$$\ln\tau_a(p) = -1.861 + 1.248\Delta\ln p, \qquad 0.3204 \le \ln p \le 0.9051,$$
$$\ln\tau_a(p) = -1.131 + 0.347\Delta\ln p, \qquad 0.9051 \le \ln p.$$

Относительные концентрации метана γ в атмосферах Юпитера и Сатурна не зависят от глубины и равны 0.0027, а для Урана:

$$\ln\gamma(p) = -9.982 + 2.676\Delta\ln p, \qquad 0.3584 \le \ln p \le 1.5445,$$
$$\gamma(p) = 0.00382, \qquad 1.6156 \le \ln p,$$

и для Нептуна:

$$\ln\gamma(p) = -9.738 + 2.561\Delta\ln p, \qquad 0.3237 \le \ln p \le 1.6156,$$
$$\gamma(p) = 0.00554, \qquad 1.6156 \le \ln p,$$

здесь p – в барах.

[1] *Дементьев М. С.* Оценка относительного содержания аэрозоля и эффективного радиуса частиц в атмосфере Урана // Кинематика и физика небес. тел. – 1992. – Т. 8, № 2. – С. 25–35.

[2] *Костогрыз Н. М.* Комбинационное рассеяние в спектре атмосферы Урана с учетом ее неизотермичности // Кинематика и физика небес. тел. – 2006. – Т. 22, № 4. – С. 254–259.

[3] *Костогрыз Н. М.* Вероятные причины долгопериодических изменений геометрического альбедо Урана // Кинематика и физика небес. тел. – 2007. – Т. 23, № 5. – С. 295–303.

[4] *Мороженко А. В.* Зоны и полосы диска Юпитера. Надоблачный слой // Астрон. вестн. – 1990. – Т. 24, № 3. – С. 275–287.

[5] *Мороженко А. В.* Комбинационное рассеяние в атмосферах планет-гигантов и оптические свойства атмосферного аэрозоля // Кинематика и физика небес. тел. – 1997. – Т. 13, № 4. – С. 22–33.

[6] *Мороженко А. В., Костогрыз Н. М.* Особенности формирования деталей комбинационного рассеяния в неизотермической атмосфере // Кинематика и физика небесн. тел. – 2005. – Т. 21, № 2. – С. 114–120.

[7] *Мороженко А. В., Овсак А. С.* Зависимости аэрозольной составляющей оптической толщины и относительной концентрации метана от глубины в атмосферах планет-гигантов // Кинематика и физика небес. тел. – 2009. – Т. 25, № 4. – С. 243–258.

[8] *Мороженко А. В., Яновицкий Э. Г.* Параметры вертикальной структуры верхних слоев атмосферы Юпитера // Письма в Астрон. журн. – 1976. – Т. 2, № 11. – С. 549–553.

[9] *Belton M. J. S., Wallace L., Price M. J.* Observation of the Raman effect in the spectrum of Uranus // Astrophys. J. – 1973. – **184**, N 3. – P. 143–146.

[10] *Brandt J. C.* A note on Rayleigh and Raman scattering Lyman-radiation from Jupiter and Saturn // Planet. and Space Sci. – 1963. – **11**, N 7. – P. 725.

[11] *Clarke D.,Grainger J. F.* The profile of H_β in the spectra of Jupiter // Planet. and Space Sci. – 1965. – **13**, N 11. – P. 1164.

[12] *Cochran W. D., Trafton L. M.* Raman scattering in the atmospheres of the major planets // Astrophys. J. – 1978. – **219**. – P. 756–762.

[13] *Jenkins E. B.* Far-ultraviolet spectroscopy of Jupiter // Icarus. – 1969. – **1**, N 3. – P. 379–385.

[14] *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.

[15] *Karkoschka E.* Methane, Ammonia, and temperature Measurements of the Jovian Planets and Titan from CCD-Spectrophotometry // Icarus. – 1998. – **133**, N 1. – P. 134–146.

[16] *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.

[17] *Neff J. S., Humm D. C., Bergstralh J. T., et al.* Absolute Spectrophotometry of Titan, Uranus, and Neptune: 350–1050 nm // Icarus. – 1984. – **60**, N 2. – P. 221–235.

[18] *Pollack J. B., Rages K., Baines K. H., et al.* Estimates of the bolorimetric albedos and radiation balance of Uranus and Neptune // Icarus. – 1986. – **65**, N 2/3. – P. 442–466.

[19] *Wallace L.* Rayleigh and Raman scattering by H2 in a planetary atmosphere // Astrophys. J. – 1972. – **176**, N 1. – P. 249–257.