

УДК 523.45-852

**А. С. Овсак¹, В. Г. Тейфель²,
А. М. Каримов², П. Г. Лысенко²**

¹Главная астрономическая обсерватория НАН Украины
ул. Академика Заболотного 27, Киев, Украина, 03143
ovsak@mao.kiev.ua

²Астрофизический институт им. В. Г. Фесенкова, Алматы, Казахстан, 050020
tejf@mail.ru

Сравнение значений величины мнимой части показателя преломления у аэрозольных частиц в широтных поясах Северного полушария Сатурна

По данным спектрофотометрических измерений 2015 г. определено соотношение значений мнимой части n_i показателя преломления у аэрозольных частиц в широтных поясах 17°N , 33°N , 49°N и 66°N диска Сатурна. Обнаружена устойчивая во времени тенденция уменьшения относительных значений величины при перемещении к северу от приэкваториального участка диска планеты до широты 49°N включительно. Получено значительное отличие значений n_i в 17°N и 49°N от других изученных широтных участков. Относительное значение величины n_i на широте 66°N в 2015 г. оказалось близким к его значению в участке 40°N в 1980 г.

Ключевые слова: Сатурн, атмосфера, широтные пояса, мнимая часть показателя преломления облачных частиц.

ВВЕДЕНИЕ

Видимая поверхность диска Сатурна оптически неоднородна. На ней выделяют широтные пояса различной яркости и цвета и с изменяющейся интенсивностью молекулярных полос поглощения [3, 7, 9, 21]. В то же время исследование поляризационных свойств различных широтных деталей диска Сатурна [1] не выявило существенных различий между ними, что указывает на вероятную близость значений размеров и действительной части показателя преломления у облачных частиц в большинстве широтных поясов диска планеты. На основании этого в работе [22] в рамках двухслойной модели атмосферы был сделан вывод о возможных причинах фотометрической широтной неоднород-

ности диска Сатурна: изменение оптической толщины надоблачного чисто газового слоя, различия концентраций облачных частиц и различная природа этих частиц.

Целью настоящей работы является определение соотношений значений мнимой части n_i показателя преломления у облачных частиц в широтных поясах Сатурна. Для этого мы используем результаты выполненного в нашей работе [6] анализа данных спектральных измерений отражательной способности широтных поясов Северной полушферы Сатурна 2015 г. в полосах поглощения метана $\lambda = 619$ и 727 нм. Дополнительно мы также сравним рассчитанные нами величины n_i с оценками, сделанными на основе анализа данных измерений диска Сатурна в 1980 г. в работе [22].

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ n_i

Используемая нами методика определения величины n_i атмосферных аэрозольных частиц в длинноволновом диапазоне видимого света при анализе спектральных характеристик отраженного планетой-гигантом излучения изложена в работах [13, 14]. С помощью этой методики в работе [14] были определены значения n_i аэрозоля в широтных поясах диска Юпитера, оказавшиеся систематически меньшими в визуально светлых зонах, чем в более темных поясах планеты-гиганта. Поэтому здесь мы изложим лишь основные положения этой методики, перенаправляя читателя за деталями к указанным работам.

При выполнении расчетов зависимости от давления аэрозольной рассеивательной составляющей атмосферы планеты-гиганта методом эффективной оптической толщины [4, 16—18] для учета поглощения света аэрозодем сейчас уже может применяться метод разделения аэрозольного и газового поглощения [13] (см. также [5, 19]). В результате выполнения таких расчетов, кроме уточнения спектральных значений величины τ_a^s и соответствующих им уровней давления, определяются также и спектральные значения аэрозольной поглощательной составляющей τ_a^s атмосферы. Полученные численные значения τ_a^s и τ_a^g позволяют рассчитать величину альbedo однократного рассеяния аэрозоля α_a согласно выражению
$$\alpha_a = \frac{\tau_a^s}{\tau_a^s + \tau_a^g}.$$

С другой стороны, согласно теории Лоренца — Ми та же величина альbedo аэрозоля α_a^{Mie} может быть рассчитана для среды, заполненной однородными сферическими частицами с заданными модельными параметрами функции распределения частиц по размерам при различных численных значениях величины n_i . Таким образом, значение величины n_i можно определить по совпадению численных значений величин α_a и α_a^{Mie} , рассчитанных по данным спектральных измерений отражательной способности планеты-гиганта и согласно теории Лоренца — Ми.

ИСХОДНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ, МОДЕЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ, ПРОГРАММНЫЕ КОДЫ

Поскольку определение величины n_i является продолжением анализа данных измерений, начатого нами в работе [6], исходные предпосылки и модельные параметры атмосферы Сатурна полностью идентичны изложенным в указанной работе, поэтому перечислим лишь наиболее существенные из них:

— в каждой исследуемой спектральной точке атмосфера Сатурна считается полубесконечной оптически однородной газовой-аэрозольной средой;

— используется модель аэрозольных частиц в виде однородных сфер со значениями параметров: действительная часть показателя преломления $n_r = 1.44$, их эффективный радиус $r_{эф} = 1.4$ мкм и дисперсия $v_{эф} = 0.07$ для функции модифицированного гамма-распределения частиц по размерам [2, 8, 20];

— согласно работе [12] основные газовые составляющие атмосферы планеты — водород (0.85) и гелий (0.15);

— относительная концентрация метана (0.0021) аналогична ее значению на Юпитере [5, 6] и постоянна на всех исследуемых высотных уровнях атмосферы;

— используемые значения монокроматических коэффициентов поглощения метана k пересчитаны с учетом физических условий в атмосфере Сатурна [11].

Для расчетов нами используется комплекс специально разработанных компьютерных программных кодов [15], объединяющий в единое решение созданные в ГАО НАН Украины методы решения задач теории переноса излучения, а также выполнения анализа и интерпретации данных спектрофотометрических измерений планет-гигантов. Для расчета характеристик рассеяния единичного объема модельной среды и подбора величины мнимой части n_i показателя преломления аэрозольных частиц, в комплекс интегрирован модуль программных кодов М. И. Мищенко [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Рассчитанные на внешних краях коротко- и длинноволновых крыльев полос поглощения метана на $\lambda = 619$ и 727 нм спектральные значения величины n_i у частиц атмосферного аэрозоля в широтных поясах 17N, 33N, 49N и 66N диска Сатурна приведены на рис. 1. В обоих исследованных полосах поглощения метана наблюдается уменьшение величины n_i при переходе от экватора к северным широтам до 49N включительно, а затем ее увеличение в поясе 66N.

Поскольку в работе [22] для анализа использовались данные фотометрических измерений диска Сатурна, полученные в узкополосном

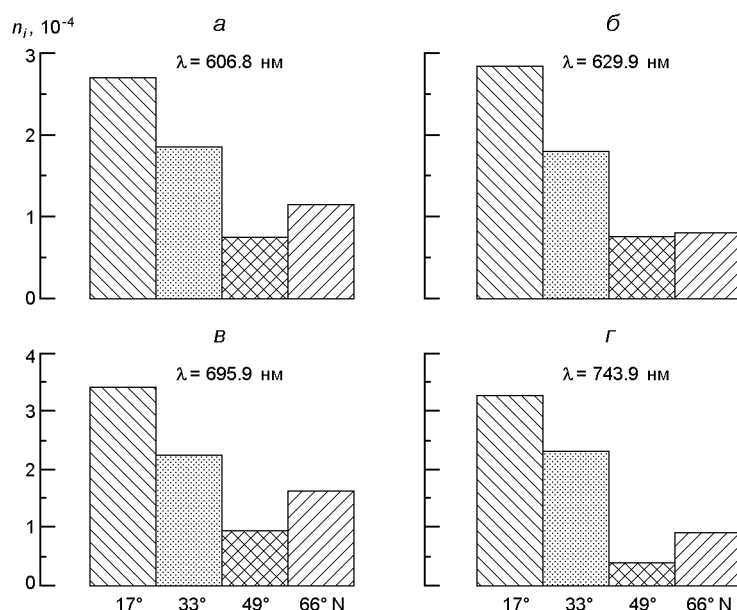


Рис. 1. Значения величины мнимой части показателя преломления аэрозольных частиц в широтных поясах Сатурна в полосе поглощения метана на 619.2 нм: *а* — коротковолновое крыло, точка на 606.8 нм, *б* — длинноволновое крыло, точка на 629.9 нм и в полосе поглощения метана на 727.6 нм: *в* — коротковолновое крыло, точка на 695.9 нм, *г* — длинноволновое крыло, точка на 743.9 нм

фильтре $\lambda = 725.0$ нм, мы выполнили расчеты значений величины n_i также и на этой длине волны.

Необходимо подчеркнуть, что полученные по используемой методике абсолютные значения величины n_i могут отличаться от их истинных значений. Возможных причин тут несколько.

Во-первых, высокая чувствительность расчетного значения величины n_i к изменениям исходных значений отражательной способности. Например, в работе [14] было определено 24 % изменение значения n_i при 5 % вариации величины геометрического альбеда планеты-гиганта.

Во-вторых, согласно выводам в работе [23] рассчитанные по методике этой работы значения эффективной оптической глубины $\tau_{\text{эф}}$ имеют значительную дисперсию, т. е. «размазанность» высотного расположения этого уровня в атмосфере планеты-гиганта. Следовательно, достоверными можно считать относительные изменения величины $\tau_{\text{эф}}$, а также и других производных от нее физических величин, но не их абсолютные значения. Поэтому для исключения влияния на оценки n_i возможных погрешностей значений отражательной способности, а также погрешностей наших расчетов, на рис. 2 представлены значения отношений величин n_i на длине волны $\lambda = 725.0$ нм для поясов 17N, 33N, 49N и 66N к значениям n_i^{Eq} в наиболее близком к экватору поясе 17N, рассчитанные нами в этой работе по данным 2015 г.

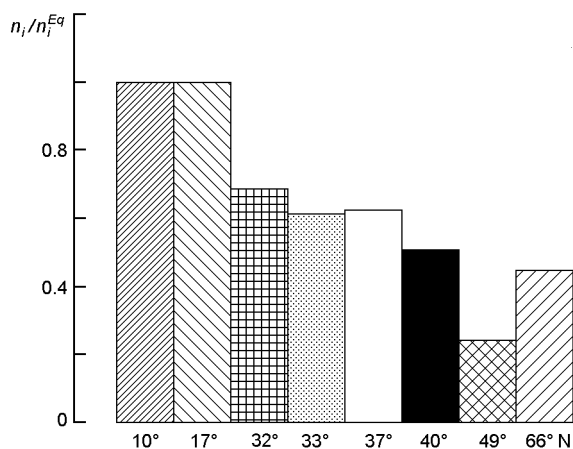


Рис. 2. Относительные изменения от экватора Сатурна к северным широтам значений мнимой части показателя преломления аэрозоля на длине волны $\lambda = 725.0$ нм по данным измерений 2015 г. (17N, 33N, 49N и 66N, наши оценки) и 1980 г. (10N, 32N, 37N и 40N, данные [22])

Рисунок дополнен отношениями величин n_i для поясов 10N, 32N, 37N и 40N к значению n_i^{Eq} в поясе 10N, полученными в работе [22]. Как видим, несмотря на разницу абсолютных значений величины n_i , а также несовпадение широт исследуемых поясов, результаты обеих работ показывают одинаковую тенденцию уменьшения величины n_i при удалении от экватора планеты на север вплоть до широты 49°.

Так же, как и в работе [22], наибольшее значение величины n_i наблюдается для приэкваториального пояса 17N, а наименьшее — для пояса 49N.

Отметим, что полученные нами значения n_i относятся к модельному аэрозолю, формирующему усредненные оптические характеристики слоя атмосферы Сатурна от ее внешнего края до уровня эффективной оптической глубины.

ВЫВОДЫ

Определено соотношение значений мнимой части показателя преломления у атмосферных аэрозольных частиц в широтных поясах Северного полушария Сатурна в 2015 г.

Сравнение с результатами анализа данных фотометрических измерений планеты-гиганта в 1980 г. на длине волны $\lambda = 725.0$ нм показало устойчивость во времени тенденции уменьшения относительных значений величины n_i при перемещении к северу от приэкваториальной области до широты 49N включительно, а также значительное отличие значений n_i в поясах 17N и 49N от других изученных широтных участков.

Авторы искренне благодарят А. В. Мороженко за советы при выполнении анализа и интерпретации полученных результатов.

1. Бугаенко О. И., Галкин Л. С., Мороженко А. В. Поляриметрические исследования планет-гигантов. I. Распределение поляризации по диску Сатурна. *Астрон. журн.* 1971. 48. № 2. С. 373—379.

2. Бугаенко О. И., Длугач Ж. М., Мороженко А. В., Яновицкий Э. Г. Об оптических свойствах облачного слоя Сатурна в видимом участке спектра. *Астрон. вестн.* 1975. 9. № 1. С. 13—21.
3. Каримов А. М., Лысенко П. Г., Тейфель В. Г., Харитонов Г. А. Северное полушарие Сатурна — поглощение метана и аммиака в 2015 году. *Изв. НАН РК. Сер. физ.-мат.* 2016. № 5. С. 97—104.
4. Мороженко А. В. О структуре облачного слоя Юпитера. *Письма в Астрон. журн.* 1984. 10. № 10. С. 775—779.
5. Овсак А. С. Определение вертикальной структуры аэрозольной составляющей в атмосфере Сатурна. *Кинематика и физика небес. тел.* 2017. 33. № 1. С. 57—80.
6. Овсак А. С., Каримов А. М., Лысенко П. Г. Сравнение характеристик вертикальной структуры аэрозольной составляющей атмосферы в широтных поясах Сатурна. *Кинематика и физика небес. тел.* 2017. 33. № 2. С. 55—70.
7. Chanover N. J., BJORAKER G. L., GLENAR D. A., HEWAGAMA T., BAINES K. H. Latitudinal variations of Saturn's near-infrared spectrum. American Geophys. Union, Fall Meeting 2005, abstract #P11C-0135.
8. Dlugach Z. M., Morozhenko A. V., Vid'machenko A. P., Yanovitskij E. G. Investigations of the optical properties of Saturn's atmosphere carried out at the Main Astronomical Observatory of the Ukrainian Academy of Sciences. *Icarus.* 1983. 54. N 2. P. 319—336.
9. Hall J. S., Riley L. A. A photometric study of Saturn and its rings. *Icarus.* 1974. 23. P. 144—156.
10. Mishchenko M. I., Travis L. D., Lacis A. A. Scattering, absorption, and emission of light by small particles. Cambridge, Cambridge University Press, 2002.
11. Morozhenko A. V. New determination of monochromatic methane absorption coefficients with regard to the thermal conditions in the atmospheres of giant planets. IV. Jupiter and Saturn. *Kinematics and Phys. Celest. Bodies.* 2007. 23. N 6. P. 245—257.
12. Morozhenko A. V., Ovsak A. S. Dependence of the aerosol component of optical thickness and the relative concentration of methane on depth in atmospheres of giant planets. *Kinematics and Phys. Celest. Bodies.* 2009. 25. N 4. P. 173—181.
13. Morozhenko A. V., Ovsak A. S. On the possibility of separation of aerosol and methane absorption in the long-wavelength spectral range for giant planets. *Kinematics and Phys. Celest. Bodies.* 2015. 31. N 5. P. 225—231.
14. Morozhenko A. V., Ovsak A. S., Vid'machenko A. P., et al. Imaginary part of the refractive index of aerosol in latitudinal belts of Jupiter's disc. *Kinematics and Phys. Celest. Bodies.* 2016. 32. N 1. P. 30—37.
15. Ovsak A. S. Upgraded technique to analyze the vertical structure of the aerosol component of the atmospheres of giant planets. *Kinematics and Phys. Celest. Bodies.* 2013. 29. N 6. P. 291—300.
16. Ovsak A. S. Changes in the characteristics of the upper layers of the jovian atmosphere from the data on the integral observations of the planetary disk. *Kinematics and Phys. Celest. Bodies.* 2015. 31. N 1. P. 25—32.
17. Ovsak A. S. Variations of the volume scattering coefficient of aerosol in the jovian atmosphere from observations of the planetary disk. *Kinematics and Phys. Celest. Bodies.* 2015. 31. N 4. P. 197—204.
18. Ovsak A. S. Vertical structure of cloud layers in the atmospheres of giant planets. I. On the influence of variations of some atmospheric parameters on the vertical structure characteristics. *Solar Syst. Res.* 2015. 49, N 1. P. 46—53.
19. Ovsak A. S., Tejfel' V. G., Vid'machenko A. P., Lysenko P. G. Zonal differences in the vertical structure of the cloud cover of Jupiter from the measurements of the methane absorption bands at 727 and 619 nm. *Kinematics and Phys. Celest. Bodies.* 2015. 31. N 3. P. 119—130.
20. Santer R., Dollfus A. Optical reflectance polarimetry of Saturn's globe and rings: IV.

- Aerosols in the upper atmosphere of Saturn. *Icarus*. 1981. 48. N 3. P. 496—518.
21. Tejfel V. G., Karimov A. M., Kharitonova G. A., Kirienko G. A. Spectrophotometric study of Saturn's atmosphere during a 16-year period (1995—2010). *Astron. and Astrophys. Transact.* 2013. 2. N 28. P. 121—134.
22. Vidmachenko A. P., Dlugach Zh. M., Morozhenko A. V. Nature of the optical nonuniformity in Saturn's disk // *Solar System Res.*—1984.—17, N 4.— P. 164—171.
23. Yanovitskij Edh. G., Ovsak A. S. Effective optical depth of absorption line formation in semi-infinite planetary atmospheres. *Kinematics and Phys. Celest. Bodies*. 1997. 13. N 4. P. 1—19.

Статья поступила в редакцию 12.10.2017

О. С. Овсак¹, В. Г. Тейфель², А. М. Каримов², П. Г. Лисенко²

¹Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України
Київ, Україна

²Астрофізичний інститут ім. В. Г. Фесенкова, Алмати, Казахстан

ПОРІВНЯННЯ ЗНАЧЕНЬ ВЕЛИЧИНИ УЯВНОЇ ЧАСТИНИ ПОКАЗНИКА ЗАЛОМЛЕННЯ АЕРОЗОЛЬНИХ ЧАСТОК В ШИРОТНИХ ПОЯСАХ ПІВНІЧНОЇ ПІВКУЛІ САТУРНА

За даними спектрофотометричних вимірювань 2015 р. визначено співвідношення значень уявної частини n_i показника заломлення атмосферних аерозольних часток у широтних поясах 17°N, 33°N, 49°N та 66°N диска Сатурна. Виявлено стійку в часі тенденцію зменшення відносних значень величини n_i при переміщенні на північ від приекваторіальної ділянки диска до широти 49°N включно. Отримано значну відмінність значень n_i у поясі 17°N та 49°N від інших вивчених широтних ділянок. Відносне значення величини n_i на широті 66°N у 2015 р. виявилось близьким до її значення у ділянці 40°N у 1980 р.

Ключові слова: Сатурн, атмосфера, широтні пояси, уявна частина показника заломлення хмарових часток.

A. S. Ovsak¹, V. G. Teifel², A. M. Karimov², P. G. Lysenko²

¹Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine
Kyiv, Ukraine

²Fesenkov Astrophysical Institute, Almaty, Kazakhstan

A COMPARISON OF VALUES OF THE IMAGINARY PART OF REFRACTIVE INDEX OF AEROSOL PARTICLES IN THE LATITUDINAL BELTS OF NORTHERN HEMISPHERE OF SATURN

With using of a spectrophotometric measurements data of 2015, relations of values of imaginary part n_i of the refractive index of aerosol was determined for latitudinal belts 17°N, 33°N, 49°N and 66°N of Saturn's disc. We determined a steady in time tendency to decrease the relative values of n_i when moving northward from the equatorial region of the disk to the latitude 49°N, inclusive. A significant difference between the values of n_i in the 17°N and 49°N from other studied latitudinal sections of the disk of a giant planet is determined. The relative magnitude of the n_i at the latitude 66°N in 2015 is close to its value at 40°N in 1980.

Keywords: Saturn, atmosphere, latitudinal belts, imaginary part of the refractive index of cloud particles.