

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES

ISSN 1991-346X

Volume 5, Number 309 (2016), 97 – 103

UDK 523.46

A.M. Karimov, P.G.Lysenko, V.G.Teifel, G.A.Kharitonova

Fessenkov Astrophysical Institute, Almaty, Kazakhstan

e-mail: tejf@mail.ru

**NORTHERN HEMISPHERE OF SATURN –
THE METHANE AND AMMONIA ABSORPTION IN 2015**

Abstract. There was studied the latitudinal distribution of the methane absorption in bands lying in the wavelength range of 600-800 nm and ammonia in the band at 645 nm by spectral observations of Saturn, made in 2015. Since the slope of the equator to the direction of the Earth and the Sun was about 24 degrees only northern hemisphere was available fully for observations. Most part of southern hemisphere was screened by the rings. The methane absorption variations in the northern hemisphere were minor, as well as in 2014. The ammonia absorption shows a slight increase with latitude similarly to that observed in weak methane bands. This may be due to the large effective optical depth of the weak bands formation in the cloud and vertical heterogeneity of the cloud layer at different latitudes.

Keywords: Saturn, atmosphere methane, ammonia, spectrophotometry.

УДК 523.46

А.М. Каримов, П.Г. Лысенко, В.Г. Тейфель, Г.А. Харитонов

Астрофизический институт им.В.Г.Фесенкова, Алматы, Казахстан

**СЕВЕРНОЕ ПОЛУШАРИЕ САТУРНА -
ПОГЛОЩЕНИЕ МЕТАНА И АММИАКА В 2015 ГОДУ**

Аннотация. Исследовано широтное распределение поглощения метана в полосах, лежащих в диапазоне длин волн 600-800 нм и аммиака в полосе 645 нм по спектральным наблюдениям Сатурна, выполненным в 2015 году. Так как наклон экватора к направлению на Землю и Солнце составлял около 24 градусов, наблюдениям было доступно только северное полушарие, а южное полушарие экранировалось кольцом планеты. Вариации метанового поглощения в северном полушарии оказались незначительными, как и в 2014 году. Аммиачное поглощение показывает некоторый рост с широтой, подобно наблюдаемому у слабых полос метана. Это может быть связано с большими эффективными оптическими глубинами формирования слабых полос в облачной среде и вертикальной неоднородностью облачного слоя на разных широтах.

Ключевые слова: Сатурн, атмосфера, метан, аммиак, спектрофотометрия.

Введение. После равноденствия 2009 года Сатурн продолжает удаляться от Солнца и в настоящее время приближается к точке афелия. Наибольшего удаления планета достигнет в 2019 году. К этому времени гелиоцентрическое расстояние Сатурна составит около 10.08 астрономических единиц (АЕ), как видно из рисунка 1.

Во время противостояния Сатурна в 2015 г. это расстояние уже было около 9.98 АЕ, тогда как в 2009 г. оно равнялось 9.45 АЕ. Из-за наклона оси вращения Сатурна к эклиптике после равноденствия одно из полушарий оказывается все более обращенным к Солнцу, тогда как противоположное в значительной степени закрывается кольцом и приток солнечной энергии к нему становится минимальным. Это, конечно, отражается на состоянии стратосферы и верхних слоев тропосферы, выражаясь в некоторых сезонных изменениях оптических и тепловых характеристик планеты на разных широтах. Изменение гелиоцентрического расстояния и наклона экватора Сатурна к направлению на Солнце являются основной причиной смены времен года на этой планете. Кроме этих факторов существенную роль в режиме «зимнего» полушария играет затенение значительной части его кольцами, обрезающими часть приходящей солнечной радиации. Удивительным образом совпадение максимальных значений наклона экватора с экстремумами гелиоцентрического расстояния создает определенное неравноправие северного и южного полушарий в получаемом от Солнца количестве энергии. Это дает себя знать при сравнении полушарий в периоды равноденствия на Сатурне, когда оба полушария находятся в одинаковых условиях освещения и видимости с Земли [1-2].

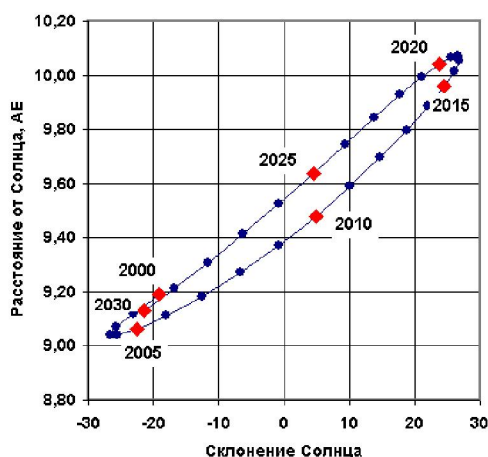


Рисунок 1 - Изменение планетоцентрического наклона Солнца и гелиоцентрического расстояния Сатурна за орбитальный период

Это сказывается наибольшим образом на состоянии стратосферы и верхней тропосферы с аммиачным облачным слоем. В глубинных слоях тропосферы основную роль, скорее всего, играет выделение внутреннего тепла из горячих недр планеты.

Наблюдения 2015 года. Несмотря на то, что уже более десятилетия вокруг Сатурна обращается космический зонд «Cassini», наземные наблюдения планеты не теряют своей актуальности и ценности, тем более, что программа работы «Cassini» в значительной степени ориентирована на исследования колец и спутников, особенно Титана и Энцелада [3].

В 2015 г. был проведен очередной цикл спектрофотометрических наблюдений Сатурна как продолжение программы исследований состояния его атмосферы и происходящих сезонных изменений на планете. Спектральные наблюдения в этом отношении дают возможность выявить изменения в вертикальной структуре облачного слоя по пространственно-временным вариациям интенсивности молекулярных полос поглощения, доступным для измерений в видимой и ближней инфракрасной области спектра. Это полосы поглощения метана, центрированные на длины волн 619, 667, 702, 725 и 787 нм, а также полоса поглощения аммиака NH₃ 645 нм. Как и в предыдущие годы, наблюдения велись на 0.6-м телескопе с дифракционным спектрографом SGS и ПЗС-камерой ST-7XE. Записывались спектры центрального меридиана Сатурна и зональные спектры при ориентации входной щели спектрографа параллельно большой оси кольца. Во втором случае осуществлялось последовательное сканирование планеты от южного лимба до северного. Таким путем в каждом скане получалось до 40 спектрограмм (рисунок 2).

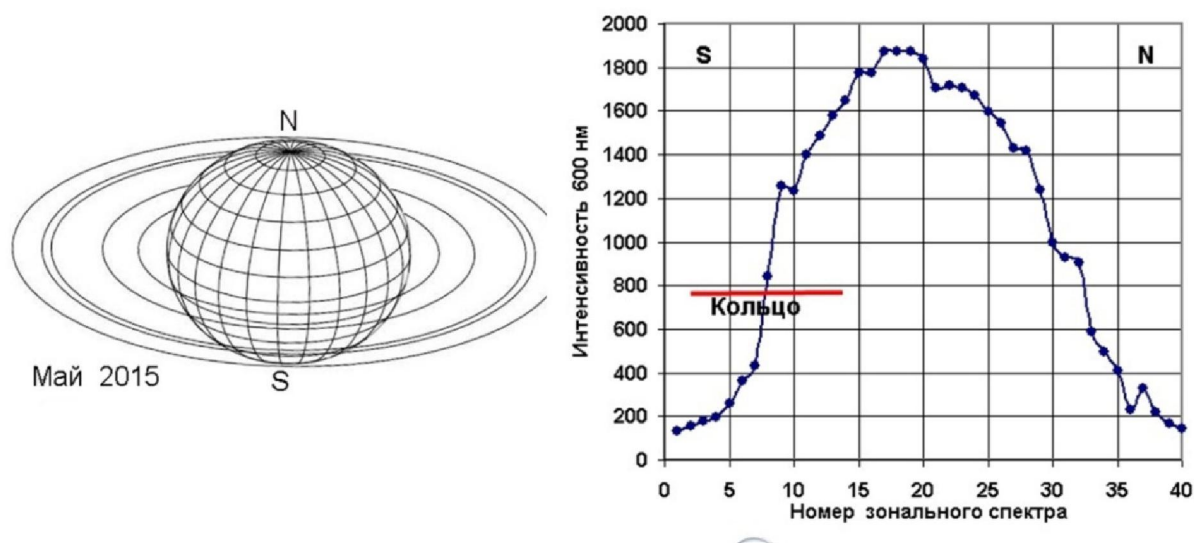


Рисунок 2 - Вид Сатурна в мае 2015 г. и пример яркостного профиля центрального меридиана Сатурна по одному из сканов

Данные о наблюдениях Сатурна приведены в таблице 1, где указаны дата и время съемки, одного спектра, экваториальный и полярный угловые диаметры диска планеты, сатурноцентрическое склонение Земли и Солнца, число записанных файлов. Все спектрограммы получались при продолжительности экспозиции 20 секунд.

Таблица 1 – Наблюдения Сатурна в 2015 г.

N	Дата	Время Т _W = Т _{зимн}	De''	Dp''	Be	Bs	Угол фазы	Число файлов
1	18-19.05.2015	00.32 – 02.08	18.5	16.87	24.4	24.6	-0.5	129
2	21-22.05.2015	22.43 – 23.20	18.5	16.87	24.4	24.6	-0.2	55
3	28-29.05.2015	23.39 – 01.33	18.5	16.87	24.3	24.6	0.6	186
4	29-30.05.2015	23.46 – 01.13	18.5	16.87	24.3	24.6	0.7	111
5	01-02.06.2015	00.00 – 01.10	18.5	16.87	24.3	24.7	1.1	120
6	02-03.06.2015	23.30 – 01.18	18.5	16.87	24.3	24.7	1.2	182
7	03-04.06.2015	23.11 – 00.38	18.5	16.87	24.3	24.7	1.3	141
8	09-10.06.2015	23.09 – 00.25	18.5	16.87	24.2	24.7	1.9	131
9	10-11.06.2015	22.38 – 00.01	18.4	16.77	24.2	24.7	2.0	153
10	11-12.06.2015	23.57 – 00.43	18.4	16.77	24.2	24.7	2.1	80
	Всего файлов							1288

Обработка полученных ПЗС-спектрограмм осуществлялась по описанной ранее [4] методике. Опорным для выделения полос поглощения служил спектр кольца, определялись профили полос и вычислялись их центральные глубины (или остаточные интенсивности в центре полосы) и эквивалентные ширины.

Полосы поглощения метана. По результатам обработки зональных спектрограмм получены данные о широтном изменении глубин и эквивалентных ширин перечисленных выше полос поглощения метана. На рисунке 3 показано, как меняется интенсивность поглощения вдоль центрального меридиана Сатурна. Спектры с номерами от 1 до 15 относятся к области диска, экранируемой кольцом, поэтому там наблюдается резкий спад поглощения. Реальные значения интенсивности полос поглощения, определяемые для свободной от экранирования части диска, относятся только к северному полушарию, наклоненному к Земле и Солнцу. Так что имеет смысл рассматривать зоны с номерами от 15 до 35. Левая часть рисунка 3 демонстрирует ход значений эквивалентных ширин полос поглощения метана вдоль центрального меридиана Сатурна по

измерениям зональных спектрограмм по одному из сканов. Аналогичные результаты получаются и по другим сканам. В северном полушарии изменение поглощения метана с широтой выражено довольно слабо. В полосе СН₄ 725 нм наблюдается небольшое снижение поглощения к высоким широтам, но в слабых полосах поглощения этого не происходит. Чтобы показать это различие, вычислялось отношение эквивалентных ширин полосы СН₄ 619 нм и полосы СН₄ 725 нм (правый график на рисунке 3). Примерно с широты около 35 градусов это отношение (W_{619}/W_{725}) начинает возрастать в направлении к северному полюсу. Различие в широтном ходе поглощения между слабыми и относительно сильными полосами может быть связано с тем, что эффективная глубина формирования молекулярного поглощения внутри облачного слоя при многократном рассеянии [5] зависит от величины коэффициента поглощения.

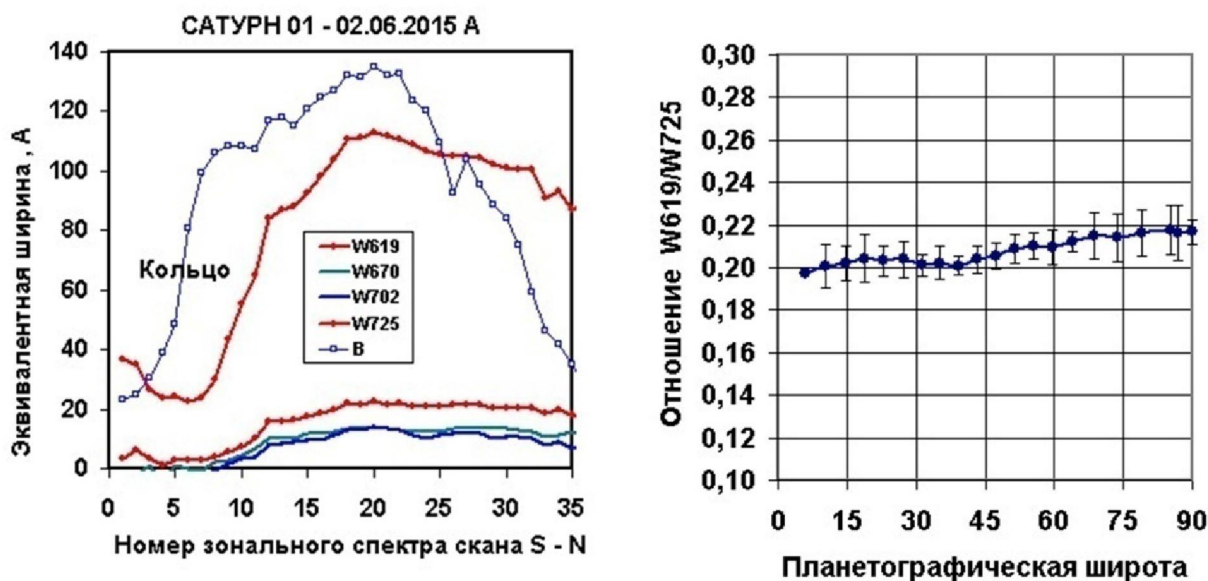


Рисунок 3 – Вариации эквивалентных ширин полос поглощения вдоль центрального меридиана Сатурна по одному из сканов (левый график) и широтный ход отношения эквивалентных ширин полос СН₄ 619 и 725 нм в северном полушарии планеты в 2015 году

Для слабых полос она больше, чем для сильных и наблюдаемые различия определяются степенью вертикальной неоднородности облачного слоя (или слоев) в разных широтных поясах планеты. Как было отмечено в нашей предыдущей статье [6], интересно, что изменение полос поглощения с широтой в северном полушарии мало зависит от геометрии освещения и наблюдения, почти не меняясь вплоть до полюса. Это показывает, что в основном слабые и умеренные полосы поглощения формируются именно внутри облачного слоя, а не в надоблачной атмосфере. Небольшой спад поглощения к высоким широтам в полосе СН₄ 725 нм можно объяснить увеличением объемной плотности аммиачных частиц, образующих видимый облачный покров Сатурна.

Полоса поглощения аммиака NH₃ 645 нм. В атмосферах Юпитера и Сатурна аммиак, несмотря на весьма малую относительную концентрацию (порядка 10⁻⁴), играет важную роль как облакообразующий агент в верхней тропосфере. В видимой части спектра наиболее заметны на Юпитере полосы поглощения NH₃ 645 и 787 нм. В атмосфере Сатурна концентрация аммиака еще ниже, чем у Юпитера, поэтому и полосы поглощения NH₃ в его спектре очень слабы. Трудность их измерения связана с тем, что обе полосы перекрываются с более интенсивными полосами поглощения метана. Поэтому реально исследованию еще доступна полоса NH₃ 645 нм, которая попадает на слабое по интенсивности коротковолновое крыло полосы метана, имеющей максимум на длине волны 667 нм (рисунок 4)

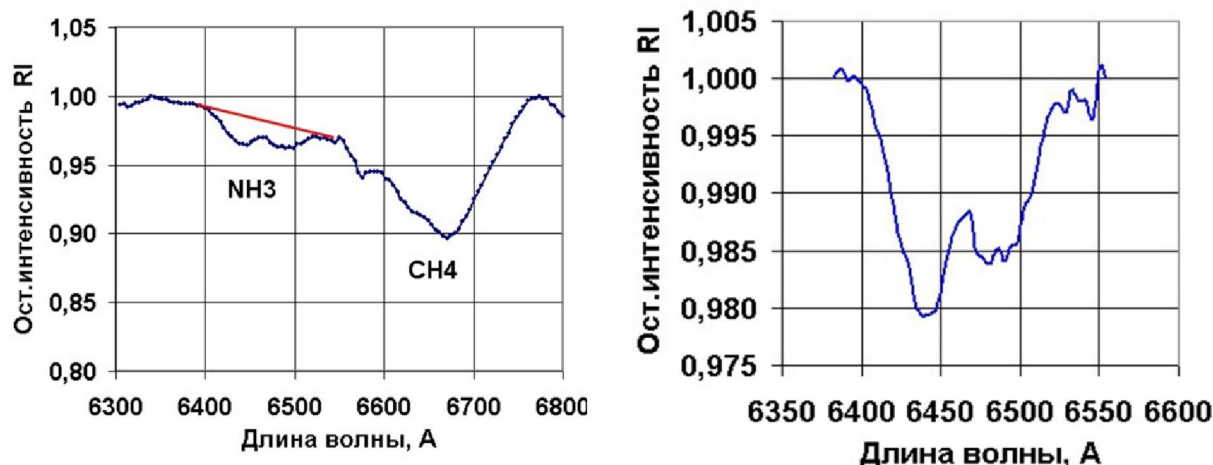


Рисунок 4 - Перекрывающиеся полосы поглощения NH_3 645 и CH_4 667 нм в спектре Сатурна (левый график) и профиль выделенной аммиачной полосы

Согласно лабораторным исследованиям [7] полоса NH_3 645 нм имеет сложную вращательную структуру, наблюдаемую при высоком спектральном разрешении. В спектрах Юпитера и Сатурна, получаемых с низким разрешением, наблюдается профиль полосы с двумя максимумами поглощения [8].

Поведение полосы NH_3 645 на диске Сатурна в сравнении с поведением полос поглощения метана представляет интерес с точки зрения процесса формирования этих полос и связи с возможными ее широтными вариациями. Сравнение это можно осуществить, выделив профиль собственно аммиачной полосы отношением к интерполированному в этом участке спектра коротковолновому крылу полосы метана, как показано на рисунке 4. Как видим, глубина полосы NH_3 645 нм весьма не велика – всего около 0.02. При этом некоторая погрешность вносится в измерения за счет интерполяций, тем более, что у длинноволновой границы аммиачной полосы находится довольно интенсивная линия фраунгоферова спектра $\text{H}\alpha$. Поэтому оказалось предпочтительным просто измерять и сравнивать полные эквивалентные ширины поглощения в участках спектра 630-660 нм (W_{645}) и 657-680 нм (W_{667}). Измерения полос поглощения усреднялись по 5 соседним зональным спектрам из трех сканов диска Сатурна в северном полушарии. В таблице 2 приведены результаты (значения W и стандартные отклонения σW) для обеих составляющих и для выделенной полосы аммиака ($W_{\text{NH}_3 645}$)

Таблица 2 – Средние значения эквивалентных ширин полос поглощения по трем сканам Сатурна

$\lambda_{\text{мр}}$	$W_{\text{NH}_3 646}$	σW	W_{645}	σW	W_{667}	σW
10.2	1.53	0.13	5.21	0.60	12.65	0.90
23.0	1.56	0.44	5.52	0.78	13.53	1.07
35.3	1.46	0.29	5.50	0.43	13.09	0.53
47.0	1.71	0.24	5.65	0.35	12.89	0.76
60.0	2.14	0.49	6.27	0.82	12.54	0.75
70.0	2.25	0.58	6.64	1.44	12.61	1.82
82.0	1.75	0.30	6.00	0.08	11.06	0.34

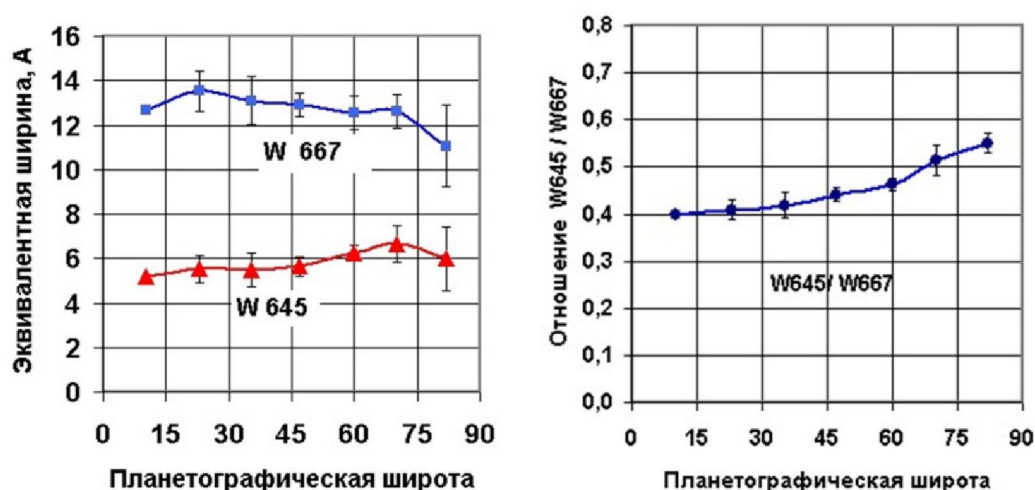


Рисунок 5 – Широтные вариации эквивалентных пиринов коротковолновой (W645) и длинноволновой (W667) составляющих комбинированной полосы поглощения метана и аммиака по трем сканам диска Сатурна

Широтные вариации составляющих в северном полушарии Сатурна получаются незначительными, но и не совсем одинаковыми (рисунок 5). Отношение эквивалентных ширин обнаруживает рост с широтой, т.е. составляющая с аммиачным поглощением показывает усиление по сравнению с метановой длинноволновой составляющей. Отметим, что понижение поглощения у обеих составляющих вблизи северного полюса на левом графике рисунка 5 может быть и ошибочным из-за близости кольца к полярному лимбу.

Закключение. Наблюдения Сатурна в 2015 году показывают, что в северном полушарии планеты, наклоненном к Солнцу, молекулярное поглощение как в полосах метана, так и в полосе аммиака 645 нм мало меняется с широтой. Однако, в слабых полосах наблюдается некоторое отличие в широтном ходе поглощения от более сильных полос. Это различие наблюдалась и ранее, особенно в период равноденствия 2009 года (см., например, статью [9] в настоящем выпуске журнала). В этом отношении поведение аммиачного поглощения не отличается от наблюдаемого у слабых метановых полос. Основную роль при формировании слабых полос поглощения в атмосферах планет-гигантов играет эффект многократного рассеяния в оптически толстой облачной среде. Согласно сводной таблице оценок относительной концентрации аммиака в разных слоях атмосферы Сатурна [10] верхний предел содержания NH_3 равен 3×10^{-4} . Это относится к тропосфере, тогда как в стратосфере относительная концентрация NH_3 меньше на 3-4 порядка. Практически все наблюдаемое поглощение создается аммиаком, находящимся в тропосфере. Полоса NH_3 645 нм в спектре Сатурна по интенсивности меньше всех полос поглощения метана в рассматриваемом диапазоне длин волн и эффективный уровень ее формирования должен лежать еще глубже, чем у полосы CH_4 667 нм. Без учета возможных локальных температурных вариаций температура в тропосфере линейно растет с глубиной, так что при равновесном соотношении концентрации газовой и твердой фазовых составляющих аммиака вертикальное распределение газообразного NH_3 отличается от распределения метана, следующего барометрическому закону. Соответственно и вертикальное распределение аммиачного аэрозоля в облачном слое, отличающееся от однородного, определяется равновесным состоянием, зависящим от температуры. Поэтому и дальнейшие исследования аммиачного поглощения на обеих планетах-гигантах должны непременно проводиться в комплексе с исследованиями поглощения метана.

Работа выполнена в рамках проекта №0073/ГФ4

ЛИТЕРАТУРА

[1] Тейфель В.Г. Распределение молекулярного поглощения по диску Сатурна по наблюдениям в 1995г. на основе зональной спектрофотометрии с ПЗС-камерой. Результаты наблюдений. *Астроном.вестник РАН*, 1997, Т.31, N3, с.222-231, *Solar System Research*, 1997, v.31, N3, p.198-206

- [2] 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). *Astronomical and Astrophysical Transactions*. – Vol. 28. - Issue 2. - 2013. – P.121-134.
- [3] Dougherty M.K., Esposito L.W., Lrimigis S.M. (Eds) *Saturn from Cassini-Huygens*. Springer, 2009, 796 PP.
- [4] Каримов А.М., Лысенко П.Г., Тейфель В.Г. Сатурн в 2014 г. – широтные вариации молекулярных полос поглощения. *Известия НАН РК Серия физико-математическая*, 2015, №4
- [5] Яновицкий Э.Г. Эффективная оптическая толщина слоя атмосферы, в котором формируется наблюдаемый спектр планеты. Концепция и элементарные оценки. *Кинематика и физика небесных тел*. - Т.13. - №6. – 1997. - С.18-25
- [6] Тейфель В.Г., Каримов А.М., Бондаренко Н.Н., Харитонов Г.А. Признаки протной асимметрии аммиачного поглощения на Сатурне. *Известия НАН РК Серия физико-математическая*, 2015, №4, С.
- [7] Giver L.P., Miller J.H., Boese R.W. A Laboratory Atlas of the 5 ν 1 NH₃ absorption band at 6475 A with applications to Jupiter and Saturn. *Icarus*, 1975, V.45, 34-48
- [8] Trafton L. Long-term changes in Saturn's troposphere. *Icarus*, 1985, V.63, N3, P.374-405.
- [9] Тейфель В.Г., Каримов А.М., Харитонов Г.А. Аммиачное поглощение на Сатурне - асимметрия широтных вариаций в период равноденствия 2009 года. *Известия НАН РК Серия физико-математическая*, 2016, №4
- [10] Fletcher L. N., Baines K. H., Momary T. W., Showman A. P., Irwin P. G. J., Orton G. S., Roos-Serote M., Merle C. Saturn's tropospheric composition and clouds from Cassini/VIMS 4.6-5.1 μ m nightside spectroscopy. *Icarus* 214 (2011), 510–533.

REFERENCES

- [1] Tejfel V.G. The distribution of molecular absorption on the disk of Saturn from observations in 1995 by zonal spectrophotometry with CCD camera. The results of observations. *Astron. Vestnik RAN*, 1997, T.31, N3, с.222-231, *Solar System Research*, 1997, v.31, N3, p.198-206
- [2] 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) *Astronomical and Astrophysical Transactions*. - Vol. 28. - Issue 2. - 2013. - P.121-134.
- [3] Dougherty M.K., Esposito L.W., Lrimigis S.M. (Eds) *Saturn from Cassini-Huygens*. Springer, 2009 796 PP.
- [4] Karimov A.M., Lysenko P.G., Tejfel V.G.. Saturn in 2014 - latitudinal variations of molecular absorption bands. *Proceedings of National Academy of Sciences of RK Series in Mathematics*, 2015, №4
- [5] Yanovitsky E.G. The effective optical depth of the layer of the atmosphere, where the observed spectrum of the planet is formed. The concept and basic assessment. *Kinematics and physics nebe.nyh bodies*. - T.13. - №6. - 1997. - S.18-25
- [6] Tejfel V.G., Karimov A.M., Bondarenko N.N., Kharitonova G.A. The signs of asymmetry of the ammonia absorption on Saturn. *Proceedings of the National Academy of Sciences of RK Series in Mathematics*, 2015, №4, S.
- [7] Giver L.P., Miller J.H., Boese R.W. A Laboratory Atlas of the 5 ν 1 NH₃ absorption band at 6475 A with applications to Jupiter and Saturn. *Icarus*, 1975, V.45, 34-48
- [8] Trafton L. Long-term changes in Saturn's troposphere. *Icarus*, 1985, V.63, N3, P.374-405.
- [9] Tejfel V.G., Karimov A.M., Kharitonova G.A. The ammonia absorption on Saturn - asymmetry of latitudinal variations in the period of equinox 2009. *Proceedings of the National Academy of Sciences of RK Series in Mathematics*, 2016, №4.
- [10] Fletcher, L. N., Baines, K. H., Momary, T. W., Showman, A. P., Irwin, P. G. J., Orton, G. S., Roos-Serote, M., Merlet, C. Saturn's tropospheric composition and clouds from Cassini / VIMS 4.6-5.1 μ m nightside spectroscopy. *Icarus* 214 (2011), 510-533.

А.М. Каримов, П.Г. Лысенко, В.Г. Тейфель, Г.А. Харитонов

В.Г. Фесенков атындағы Астрофизика институты, Алматы, Қазақстан

САТУРННЫҢ СОЛТҮСТІК ЖАРТЫШАРЫ - 2015 ЖЫЛЫ МЕТАН ЖӘНЕ АММИАКТЫҢ ЖҰТЫЛУЫ

Аннотация. 2015 жылы орындалған 600-800 нм толқын ұзындығы диапазонында жатқан жолақтар бойынша метанның жұтылуы және Сатурнның спектрлік бақылаулары бойынша 645 нм жолағында аммиактың жұтылуы ендік таралуы зерттелді. Жер мен Күн бағытына қарай экватордың ені 24 градус шамасын құрағандықтан бақылауларға тек ғана солтүстік жарты шар қол жетімді болды, ал оңтүстік жарты шар тек планета сақинасымен қалқалайды. Солтүстік жарты шарда метанның жұту вариация 2014 жылы да шамалы болды. Аммиактың жұтылуы метанның әлсіз жолақтарында бақыланып ұқсас ендікпен бірнеше өсімін көрсетеді. Бұл әртүрлі ендіктерде бұлт айналасында және бұлт қабаты вертикалды әртектілігінде әлсіз жолақтарда қалыптасудың үлкен тиімді оптикалық тереңдігімен байланысты болуы мүмкін.

Түйін сөздер: Сатурн, атмосфера, метан, аммиак, спектрофотометрия.