

22.06.90

1402

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНСКОЙ ССР  
ГЛАВНАЯ АСТРОНОМИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ

На правах рукописи

КАРМЕЛОК Анна Ивановна

УДК 523.46-355

МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ПОЛОСЫ ПОГЛОЩЕНИЯ  
АММИАКА  $\lambda$  6450 Å и МЕТАНА  $\lambda$  6800 Å  
В СПЕКТРЕ САТУРНА  
И ФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЕГО АТМОСФЕРЫ

Специальность - 01.03.03 - гелиофизика и физика  
Солнечной системы

А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Киев - 1990



2. Впервые определена вращательная температура, давление, плотность и относительная концентрация аммиака на уровне формирования отдельных линий поглощения аммиака.

3. Впервые определены концентрация метана и давление на уровне образования линий полосы поглощения метана  $6800 \text{ \AA}$ .

На защиту выносятся:

1. Методика поиска слабых линий поглощения, находящихся на уровне шума.

2. Данные о структуре полос поглощения аммиака  $6450 \text{ \AA}$  и метана  $6800 \text{ \AA}$ .

3. Данные об интенсивности линий аммиака и метана вышеуказанных полос поглощения.

4. Данные о значениях параметров верхней атмосферы Сатурна на уровне образования линий полосы поглощения аммиака  $6450 \text{ \AA}$  - вращательной температуры, давления и относительной концентрации аммиака и метана.

Научное и практическое значение работы.

Полученные в диссертации результаты по наблюдениям полос поглощения аммиака  $6450 \text{ \AA}$  и метана  $6800 \text{ \AA}$  являются необходимой предпосылкой для построения корректных физических моделей атмосферы Сатурна. Полученные данные также могут быть полезными при планировании и проведении космических экспериментов по прямому зондированию атмосфер планет-гигантов.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы, содержит 100 страниц машинописного текста, иллюстрируется 69 рисунками и 35 таблицами. Список литературы состоит из 135 наименований. Общий объем диссертации - 241 страница.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко обосновывается постановка задачи, её актуальность и пути её решения.

В первой главе дан обзор работ, посвященных проблеме обнаружения аммиака на Сатурне, а также лабораторных и теоретических работ по изучению тонкой структуры соответствующих полос аммиака и метана.

Вторая глава посвящена описанию наблюдательного материала и



выбору методики его обработки. Для обработки мы использовали спектрограммы Сатурна, полученные в 1969 и 1971 гг. Н.Б.Ибрагимовым в фокусе куде 2-метрового рефлектора Шемахицкой астрофизической обсерватории АН АзербСССР с дисперсией 6 Å/мм. Спектральное разрешение в зависимости от ширины щели составляло 0.16 (10 спектрограмм) и 0.24 Å (6 спектрограмм), пространственное разрешение - около 3". При наблюдениях щель ориентировалась вдоль экватора и центрального меридиана планеты. Наблюдательный материал был получен на плёнке А-700. В качестве стандартного спектра сравнения использовались спектрограммы Луны, полученные в период наблюдений Сатурна с тем же спектральным разрешением и на той же плёнке. Для калибровки впечатывался шестиступенчатый ослабитель. Как показало исследование рабочих диапазонов плотностей на всех спектрограммах, используемых в работе, то все они лежат на линейных частях характеристических кривых, проведённых довольно уверенно. Для исследования спектрального разрешения изучался профиль линий неона  $\lambda\lambda 5975.53$  и  $6030.00$  Å, которые отличаются чрезвычайно малыми собственными полуширинами. Оказалось, что средние ширины инструментального профиля составляли 0.163 и 0.225 Å при рабочих ширинах щели спектрографа 0.1 и 0.15 мм. Задача поиска линий планетного спектра, глубины которых лишь ненамного превышают уровень "шума", а иногда находятся и под ним, решалась как на этапе выбора методики записи индивидуальных спектрограмм, так и на этапе их обработки. Для этого все спектрограммы Сатурна и Луны записывались в почернениях на микрофотометре МФ-4 ГАО АН УССР. Для уменьшения влияния зерна фотоэмульсии ("шума") при записи спектрограмм Сатурна в области полосы поглощения аммиака  $\lambda 6450$  Å ширина щели выбиралась максимальной. Кроме того, проводилось ещё графическое усреднение нескольких записей, благодаря чему уверенно регистрировались депрессии, глубины которых составляли 0.02-0.03. Определение длин волн проводилось с погрешностью 0.1 Å для спектрограмм, ориентированных по центральному меридиану, и 0.14 Å - по экватору. Ошибка определения эквивалентных ширин линий аммиака и метана в спектре Сатурна контролировалась оценками эквивалентных ширин слабых фраунгоферовых линий на каждой спектрограмме и их сравнением с соответствующими данными атласа Миннарта.

В третьей главе определены характеристики полос поглощения аммиака  $\lambda 6450$  Å и метана  $\lambda 6800$  Å:



1) Средние значения эквивалентных ширин "синей" и "красной" компонент полосы поглощения аммиака  $\lambda$  6450 Å для центра диска Сатурна, а также этой полосы поглощения в целом, равные:

$$\begin{array}{ll} \text{1969 год} & \text{1971 год} \\ \sqrt{W}_{6475} = (0.77 \pm 0.07) \text{ Å} (\sigma = 0.21 \text{ Å}) & \sqrt{W}_{6475} = (0.46 \pm 0.04) \text{ Å} (\sigma = 0.11 \text{ Å}) \\ \sqrt{W}_{6445} = (0.75 \pm 0.06) \text{ Å} (\sigma = 0.18 \text{ Å}) & \sqrt{W}_{6445} = (0.63 \pm 0.05) \text{ Å} (\sigma = 0.15 \text{ Å}) \\ \sqrt{W}_0 = (1.52 \pm 0.13) \text{ Å} (\sigma = 0.36 \text{ Å}) & \sqrt{W}_0 = (1.09 \pm 0.08) \text{ Å} (\sigma = 0.23 \text{ Å}) \end{array}$$

2) отождествлены около 150 линий поглощения аммиака и определены их длины волн, для 77 из них приведена расшифровка по квантовым числам J и K.

3) а) Для 19 линий в центре диска Сатурна определены эквивалентные ширины, средние значения которых в предположении отсутствия временных вариаций равны:

Таблица I. Эквивалентные ширины линий аммиака в спектре Сатурна и их расшифровка

№ п/п	$\lambda$ , Å	$\sqrt{W}$ , мÅ	$\sigma_w$ , мÅ	Расшифровка		
				Обозначение	J	K
I.	6444.6	6.7	0.8	$Q_R$	3 <sub>+</sub>	1 <sub>+</sub>
2.	6445.6	10.1	1.0	$Q_R$	3	2 <sub>-</sub>
3.	6446.4	12.3	1.3	$Q_R$	3	3 <sub>+</sub>
4.	6447.2	6.0	1.1	-	-	-
5.	6449.2	3.8	1.7	$Q_R$	2	2 <sub>+</sub>
6.	6451.1	6.9	1.6	-	-	-
7.	6452.1	3.8	1.0	$Q_R$	2	0 <sub>-</sub>
8.	6452.6	10.7	1.0	$Q_R$	2	1 <sub>+</sub>
9.	6454.1	4.1	0.5	$Q_R$	2	2 <sub>-</sub>
10.	6454.3	4.7	0.8	$Q_Q$	5	5 <sub>+</sub>
					5	4 <sub>+</sub>
					4	4 <sub>+</sub>
II.	6457.1	17.0	1.3	$Q_R$	1	0 <sub>+</sub>
					1	1 <sub>-</sub>
12.	6459.1	2.9	0.7	$Q_Q$	5	3 <sub>-</sub>
					5	4 <sub>-</sub>
					4	4 <sub>-</sub>
13.	6460.5	3.9	0.6	$Q_Q$	3	3 <sub>-</sub>

№№ шп	$\lambda, \text{Å}$	$W, \text{мА}$	$W, \text{мА}$	Расшифровка		
				Обозначение	$J$	$K'$
14.	6465.4	8.2	1.5	$^{\circ}Q$	{ 5 4 4 3	{ 3 <sub>+</sub> 2 <sub>+</sub> 3 <sub>+</sub> 3 <sub>+</sub>
15.	6470.7	7.1	1.0	$^{\circ}R$ $^{\circ}Q$	{ 0 5	{ 0 <sub>-</sub> 2 <sub>-</sub>
16.	6472.0	11.3	2.5 <sup>o</sup>	$^{\circ}Q$	5	1 <sub>-</sub>
17.	6474.2	10.3	1.7	$^{\circ}Q$	1	1 <sub>-</sub>
18.	6479.3	6.7	1.8	$^{\circ}Q$	{ 5 1	{ 3 <sub>+</sub> 1 <sub>+</sub>
19.	6490.5	4.2	1.3	$^{\circ}P$	2	1 <sub>-</sub>

б) для восьми наименее блендированных линий аммиака определены остаточные интенсивности (см. табл. 2) и построены их усреднённые контуры:

Таблица 2. Остаточные интенсивности и их ошибки линий аммиака

№№ шп	$\lambda, \text{Å}$	$2\sigma_1 = 0.225 \text{ Å}$		$2\sigma_2 = 0.163 \text{ Å}$	
		$R_{\lambda_0} \pm \sigma_{\lambda}$	$\sigma$	$R_{\lambda_0} \pm \sigma_{\lambda}$	$\sigma$
1.	6444.6	$0.964 \pm 0.005$	0.013	$0.963 \pm 0.003$	0.010
2.	6445.6	$0.952 \pm 0.005$	0.013	$0.953 \pm 0.003$	0.010
3.	6446.4	-	-	$0.948 \pm 0.006$	0.018
4.	6452.1	-	-	$0.980 \pm 0.005$	0.015
5.	6452.6	$0.952 \pm 0.005$	0.013	$0.954 \pm 0.003$	0.015
6.	6457.1	0.925	-	$0.929 \pm 0.006$	0.018
7.	6460.5	-	-	$0.976 \pm 0.005$	0.015
8.	6465.4	-	-	$0.952 \pm 0.007$	0.020

4) Отождествлены и определены длины волн свыше 60 линий метана полосы поглощения  $\lambda 6800 \text{ Å}$ , в том числе линии с предполагаемой расшифровкой по вращательному квантовому числу  $J \geq 6$ .

Таблица 3. Структура полосы поглощения метана  $\lambda 6800 \text{ \AA}$  в спектре Сатурна

№№ пп	$\lambda, \text{ \AA}$	№№ пп	$\lambda, \text{ \AA}$	№№ пп	$\lambda, \text{ \AA}$	№№ пп	$\lambda, \text{ \AA}$
1.	6784.3	18.	6803.2	35.	6818.2	52.	6831.8
2.	6785.0	19.	6804.2	36.	6818.6	53.	6833.0?
3.	6786.7	20.	6804.7	37.	6818.8	54.	6833.4
4.	6787.2	21.	6807.0	38.	6819.2	55.	6834.2
5.	6788.2	22.	6807.9	39.	6819.5	56.	6835.2
6.	6789.7	23.	6803.3	40.	6820.2	57.	6837.5
7.	6790.7	24.	6810.0	41.	6821.9	58.	6839.7
8.	6793.2	25.	6811.3	42.	6823.5?	59.	6846.8
9.	6793.8	26.	6812.0	43.	6823.8	60.	6848.8
10.	6794.3	27.	6813.0	44.	6824.2	61.	6850.8
11.	6795.7	28.	6814.6	45.	6824.7	62.	6851.3
12.	6796.4	29.	6815.1	46.	6825.2	63.	6852.2
13.	6797.3	30.	6815.6	47.	6826.7	64.	6853.2
14.	6798.5	31.	6816.0	48.	6827.0?	65.	6853.8
15.	6798.9	32.	6816.9	49.	6829.8	66.	6856.1
16.	6799.7	33.	6817.5	50.	6830.3?	67.	6856.7?
17.	6800.8	34.	6818.0	51.	6831.4		

5) Определены эквивалентные ширины ( $\overline{W}$ ) и центральные остаточные интенсивности ( $R_{\nu}$ ), полуширины линий ( $\delta$ ) (см. табл. 4) и построены усреднённые контуры трёх линий метана полосы поглощения  $\lambda 6800 \text{ \AA}$ :  $6818 \text{ \AA} - R(0)$ ,  $6814.6 - R(1)$  и неотжествлённой компоненты  $\lambda 6816.0 \text{ \AA}$  в центре диска ( $\mu_0 = 1$ ) и краевой зоне ( $\mu_0 = 0.75$ ).

Таблица 4. Характеристики линий поглощения метана полос  $\lambda 6800 \text{ \AA}$

$\lambda, \text{ \AA}$	$\gamma$	$\mu_0$	$\overline{W}(\text{ \AA})$	$R_{\nu 0}$	$\delta, \text{ \AA}$
6818.8	0	I	$32.0 \pm 5.0$	$0.905 \pm 0.010$	$0.118 \pm 0.015$
		0.75	$23.0 \pm 5.0$	$0.924 \pm 0.010$	$0.111 \pm 0.015$
6816.3	?	I	$13.0 \pm 2.0$	$0.945 \pm 0.010$	$0.103 \pm 0.015$
		0.75	$10.0 \pm 2.0$	$0.952 \pm 0.010$	$0.092 \pm 0.015$
6814.6	I	I	$22.0 \pm 5.0$	$0.923 \pm 0.010$	$0.118 \pm 0.015$



6) Интенсивность линий поглощения метана несколько уменьшается при переходе от центра диска к краю.

В четвертой главе выполнен анализ существующих ныне моделей вертикальной структуры атмосфер планет. Обосновывается выбор модели полубесконечного газово-аэрозольного слоя для интерпретации результатов наблюдений полосы поглощения аммиака  $\lambda 6450 \text{ \AA}$  и неоднородной (двухслойной) модели для интерпретации наблюдений полосы поглощения метана  $\lambda 6800 \text{ \AA}$ . Описывается методика определения вращательной температуры Сатурна на уровне образования линий поглощения аммиака с применением метода Соболева построения кривых роста. Определение вращательной температуры  $T_{\text{вр}}$  проводилось хорошо известным методом сравнения интенсивностей линий с различающимися квантовыми числами  $J$  и  $K$ . Для вычисления  $T_{\text{вр}}$  использовались II линии аммиака. Оказалось, что  $T_{\text{вр}} = 131 \pm 20 \text{ K}$ . Кроме того, предполагая лоренцовский контур линий поглощения аммиака в спектре Сатурна, было определено ещё и атмосферное давление на уровне их формирования в облачном слое. Сравнивая наблюдаемые контуры 8 практически неblendированных линий поглощения аммиака с рассчитанными для разных значений атмосферного давления и полученной выше величины вращательной температуры, было получено  $P = 1.2 \pm 0.4 \text{ атм}$ . Отметим, что сравнению с наблюдаемыми предшествовало математическое искажение теоретически рассчитанных контуров линий путём свёртки:

$$R_{\nu} \sim \int_{-\infty}^{\infty} p(\nu-x) \exp(-x^2/2\sigma^2) dx$$

за влияние инструментального контура  $\exp(-x^2/2\sigma^2)$ .

Для линий поглощения метана в рамках упомянутой выше двухслойной модели атмосферы были определены поглощающая компонента оптической толщи надоблачного слоя метана ( $\tau_{\text{во}} \leq 0.004$ ), величина атмосферного давления на уровне формирования линий метана в облачном слое ( $P = 1.5 \pm 0.4 \text{ атм}$ ), т.е. линии полос метана  $\lambda 6800 \text{ \AA}$  и аммиака  $6450 \text{ \AA}$  формируются практически на одном и том же уровне в облачном слое Сатурна. По данным о величинах центральных остаточных интенсивностей линий поглощения метана и аммиака была ещё определена относительная концентрация аммиака по отношению к метану, которая оказалась равной  $(1.5 \pm 0.6) \cdot 10^{-2}$ . Для сравнения была также оценена эта величина с использованием полосы по-

глощения метана на  $7270 \text{ \AA}$ , которая оказалась равной  $(2.0 \pm 0.7) \cdot 10^{-2}$ . Как видно, в пределах ошибок измерений полученные относительные концентрации аммиака совпадают и в среднем составляют  $(1.8 \pm 0.7) \cdot 10^{-2}$ .

Предполагая известным объёмный коэффициент рассеяния в облачном слое (по данным других авторов) были ещё оценены объёмные концентрации аммиака и метана, а также их парциальные давления.

В заключении сформулированы итоги работы и намечены перспективные исследования атмосферы Сатурна методами спектрофотометрии.

В приложении приводятся некоторые рисунки и таблицы.

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Разработана методика обнаружения слабых линий поглощения планетного спектра, интенсивность которых находится на уровне шума.
2. Оценено влияние ошибок, вызванных неоднородностью фотоэмульсии, в среднем не превышающая  $1 \text{ м\AA}$  (глубина "линий" в шуме  $\leq 0.01$ ), эффектами блендирования планетных линий, неточностью проведения уровня непрерывного спектра. Разработана методика контроля надёжности определения интенсивностей линий.
3. Отождествлены в спектре Сатурна около 150 линий, из которых, по крайней мере, 100 зафиксированы надёжно и принадлежат полосе поглощения аммиака  $\lambda 6450 \text{ \AA}$ ; отождествлены свыше 60 линий метана в полосе поглощения  $\lambda 6800 \text{ \AA}$ . Проведено исследование структуры этих полос.
4. Определены интенсивности 19 линий аммиака в полосе  $\text{NH}_3$   $\lambda 6450 \text{ \AA}$  и интегрально полосы для центра диска. Определены интенсивности трёх линий метана полосы  $\lambda 6800 \text{ \AA}$  для центра ( $\mu_0 = 1$ ) и усреднённой краевой зоны ( $\mu_0 = 0.75$ ). Получены усреднённые контуры 8 линий аммиака для центра диска и трёх линий метана для центра и его краевой зоны.
5. Определена вращательная температура внутри облачного слоя на уровне формирования линий аммиака полосы поглощения  $\lambda 6450 \text{ \AA}$ , равная  $131 \pm 20 \text{ K}$ . На основании хорошей согласованности ряда ( $n = 54$ ) средних вращательных температур, полученных в результате сравнения интенсивностей одиннадцати линий аммиака с известными расшифровками по квантовым числам  $J$  и  $K$ , можно заключить, что расшифровка линий в полосе  $\text{NH}_3$   $\lambda 6450 \text{ \AA}$  и отождествление её как

5)  $\text{NH}_3$  является верным.

6. Давление на уровне формирования линий аммиака равно  $(1.2 \pm 0.4)$  атм. и его парциальное давление равно  $(3.2 \pm 1.2) \cdot 10^{-5}$  атм.

7. Объёмная концентрация газообразного аммиака равна  $(1.8 \pm 0.6) \cdot 10^{15}$  см $^{-3}$  и его плотность равна  $(5.0 \pm 1.7) \cdot 10^{-8}$  г·см $^{-3}$ .

8. Оптическая толщина не превышает 0.004.

9. Давление на уровне образования линий метана полосы 6800 Å равно  $(1.5 \pm 0.4)$  атм., объёмная концентрация метана на уровне образования линии  $\text{CH}_4$  λ6818.8 Å равна  $(11.7 \pm 3.0) \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$ , его плотность составляет  $(3.1 \pm 0.7) \cdot 10^{-6}$  г·см $^{-3}$  и парциальное давление равно  $(2.1 \pm 0.9) \cdot 10^{-3}$  атм.

10. Относительная концентрация аммиака по отношению к метану составляет  $(1.8 \pm 0.7) \cdot 10^{-2}$ .

Апробация работы и публикация результатов. Результаты диссертации докладывались на Республиканской конференции молодых учёных (Киев, 1985 г.), на Орловских чтениях (Киев, 1979 г.), на Всесоюзном семинаре рабочей группы по исследованию атмосфер планет-гигантов (Алма-Ата, 1980 г.), на научном семинаре Института физики АН УССР (г.Киев, 1984 г.) и неоднократно - на научных семинарах отдела физики планет ГАО АН УССР (г.Киев).

Список работ по теме диссертации:

1. Аврамчук В.В., Кармелюк А.И. Исследование поглощения аммиака вблизи 6450 Å в спектре Сатурна. I. Наблюдения. // Астрометрия и астрофизика. - 1984. - Вып. 51. - С. 51-56.

2. Аврамчук В.В., Кармелюк А.И. Исследование полосы поглощения аммиака вблизи 6450 Å в спектре Сатурна. II. Количественный анализ наблюдений. // Астрометрия и астрофизика. - 1984. - Вып. 52. - С. 30-37.

3. Аврамчук В.В., Кармелюк А.И., Намазов Ш.М. О поглощении метана вблизи 6800 Å в спектре Юпитера и Сатурна. I. // Астрометрия и астрофизика. - 1980. - Вып. 42. - С. 26-36.

4. Кармелюк А.И. Тонкая структура полосы поглощения аммиака вблизи 6450 Å в спектре Сатурна. // Астрон. циркуляр. - 1983. - № 1253. - С. 5-6.

5. Кармелюк А.И. Об условиях формирования линий полосы поглощения  $\text{CH}_4$  вблизи 6800 Å в спектрах Юпитера и Сатурна. - Киев, 1989. - 41 с. - Деп. в ВИНТИ 01.12.89 № 7177-В89.



6. Кармелюк А.И. Об условиях формирования линий полосы поглощения  $\text{CH}_4$  вблизи  $6800 \text{ \AA}$  в спектрах Юпитера и Сатурна. // Кинематика и физика небесных тел АН УССР. - 1990. - 6, № 2. - С.65.

7. Кармелюк А.И., Аврамчук В.В. Физические параметры атмосферы Сатурна, определённые по полосе поглощения аммиака  $645.0 \text{ нм}$ . - Киев, 1990. - 40 с. - Деп. в ВИНТИ 14.02.90, № 850-В90.



Подп. к печ. 12.05.90 БФ 17505 Формат 60x84/16 Бумага ММ 124Р.  
Печ. офс. Усл. печ. л. 0,69 Уч.-изд. л. 0,50 Тираж 100  
Зак. С. 3221. Бесплатно.

Киевская книжная типография научной книги. Киев. Репина, 4.