

# **ФИЗИКА ПЛАНЕТ**

УДК 523.45

**В. В. Аврамчук, Л. А. Бугаенко,  
А. В. Мороженко, Э. Г. Яновицкий**

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ЮПИТЕРА, ВЫПОЛНЕННЫХ В ГЛАВНОЙ АСТРОНОМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ АН УССР**

### **I. ВВЕДЕНИЕ**

Конечной целью исследований атмосфер планет, выполненных различными методами и в различных участках спектра, является построение их моделей. Эти модели должны объяснить результаты всех имеющихся наблюдений. Обширная информация, полученная космическими аппаратами «Пионер-10» и «Пионер-11», существенным образом облегчает задачу построения модели атмосферы Юпитера, однако она, конечно, не может заменить всего объема данных, накопленных в течение ряда десятилетий наземными методами.

В Главной астрономической обсерватории АН УССР систематические наблюдения Юпитера были начаты в 1963 г. и продолжаются по настоящее время. За этот период накоплен большой наблюдательный материал, который частично опубликован в различных изданиях, что затрудняет его использование. Поэтому мы сочли полезным дать обзор основных результатов, полученных в Киеве. В этот обзор мы включаем как уже опубликованные результаты, так и некоторые новые. Приведенная в конце статьи библиография почти полностью охватывает все опубликованные результаты наших исследований Юпитера. Однако по вполне понятным причинам ссылки на работы, выполненные другими исследователями, у нас крайне ограничены и ни в коей мере не могут претендовать на полноту.

### **II. СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛОС ПОГЛОЩЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ ЮПИТЕРА**

Основная задача спектрофотометрического метода состоит в измерении эквивалентных ширин молекулярных полос поглощения, изучении распределения интенсивности полос поглощения по диску и ее временных вариаций. Характер распределения интенсивности по диску служит критерием для выбора модели строения верхних слоев атмосферы планеты. Изучение сильных полос поглощения метана и аммиака в спектре Юпитера показывает, что процессы многократного рассеяния играют существенную роль в формировании спектра поглощения. В этом случае дополнительную информацию о вертикальной структуре облачного слоя может дать изучение слабых полос поглощения, формирующихся в более глубоких слоях атмосферы.

В ГАО АН УССР спектрофотометрические исследования Юпитера проводились в основном в течение двух периодов разными методами.

1. С 1963 по 1966 г. фотографическим методом изучалось распределение по диску поглощения в полосах метана ( $6190 \text{ \AA}$ ) и аммиака ( $6441, 6478 \text{ \AA}$ ). Эти результаты в основном опубликованы В. В. Аврамчуком [1–3, 5, 6].

2. Исследование полос поглощения метана и аммиака (в том числе и очень слабых) в участке спектра от  $4500$  до  $8500 \text{ \AA}$  проводилось

фотоэлектрическим методом в оппозиции 1969 и 1970 гг. Основные результаты приведены в работах Л. А. Бугаенко и др. [10, 11].

Сначала остановимся на основных результатах, полученных фотографическим методом. Наблюдения полос  $\text{CH}_4$  (6190 Å) и  $\text{NH}_3$  (6441 и 6478 Å) были выполнены на 70-сантиметровом рефлекторе с дифракционным спектрографом (дисперсия 30 Å/mm, разрешение  $\sim 1$  Å). Размер исследуемых деталей на диске планеты составлял 1.5—2".

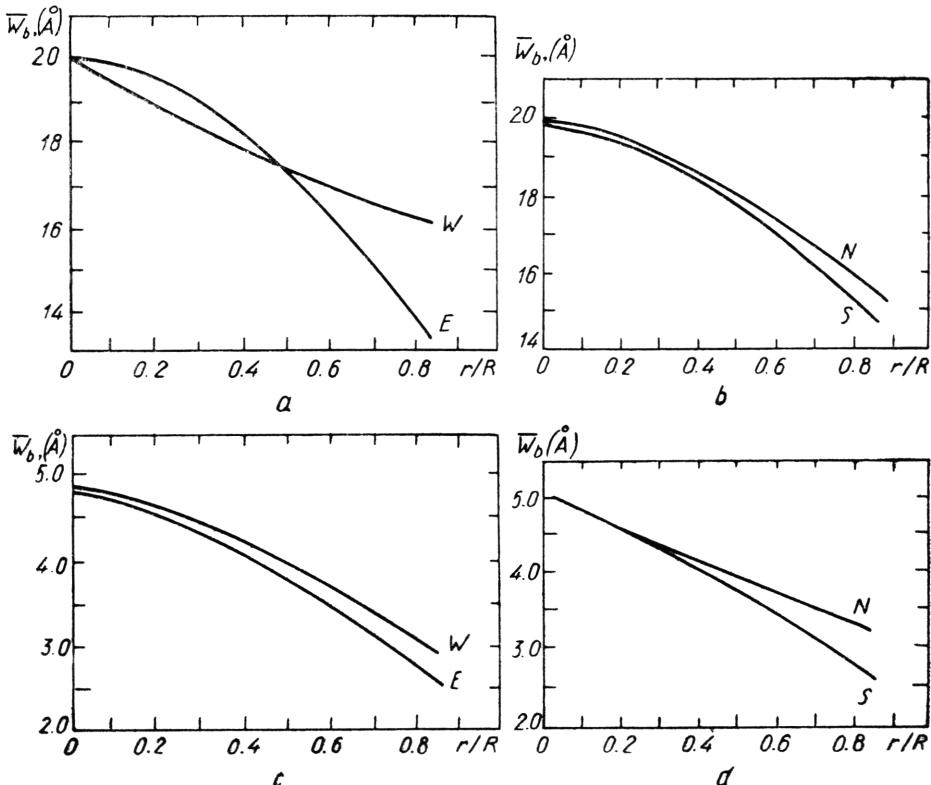


Рис. 1. Распределение по диску Юпитера средних (усреднение по  $\sim 100$  спектрограммам) значений эквивалентных ширин полос поглощения  $\text{CH}_4$  6190 Å (a, b);  $\text{NH}_3$  6441 + 6478 Å (c, d); W — направление центр—запад, E — центр—восток, N — центр—север, S — центр—юг.

На основании обширного наблюдательного материала (около 100 спектрограмм) установлено, что интенсивность этих полос поглощения существенно меняется со временем. При этом изменяются не только значения эквивалентных ширин  $\bar{W}_b$  и глубин полос  $1-\bar{R}_b$  ( $\bar{R}_b$  — остаточная интенсивность в центре полосы), но и характер их распределения по диску планеты. Из-за сложности явления необходимо было использовать для обработки наблюдательных данных регрессионный анализ. Изложение метода и техники расчета дано в работе В. В. Аврамчука [5]. Здесь мы отметим только, что задача сводилась к установлению вида функциональных зависимостей средних значений величин  $\bar{W}_b$  и  $\bar{R}_b$  от расстояния от центра диска. Для того, чтобы средние значения  $\bar{W}_b$  (и соответственно  $\bar{R}_b$ ) для отдельных точек диска оказались несмещанными, резко выделяющиеся величины  $W_b$  и  $R_b$  были исключены. Они исследовались отдельно, ибо причиной их аномального поведения могли быть реальные процессы в атмосфере планеты.

Кривые распределения средних значений  $\bar{W}_b$  молекулярных полос  $\text{CH}_4$  6190 Å и  $\text{NH}_3$  6441+6478 Å по диску Юпитера представлены на рис. 1. Отметим, что вблизи  $\lambda$  6450 Å отчетливо выделяются перекрывающиеся полосы поглощения  $\text{NH}_3$  с максимумами около 6441 и 6478 Å. Поэтому, чтобы не вносить дополнительных погрешностей, определялась суммарная эквивалентная ширина этих полос. Для исключения фраунгоферовых линий использовались спектрограммы Солнца, полученные с тем же спектральным разрешением, что и спектрограммы планеты.

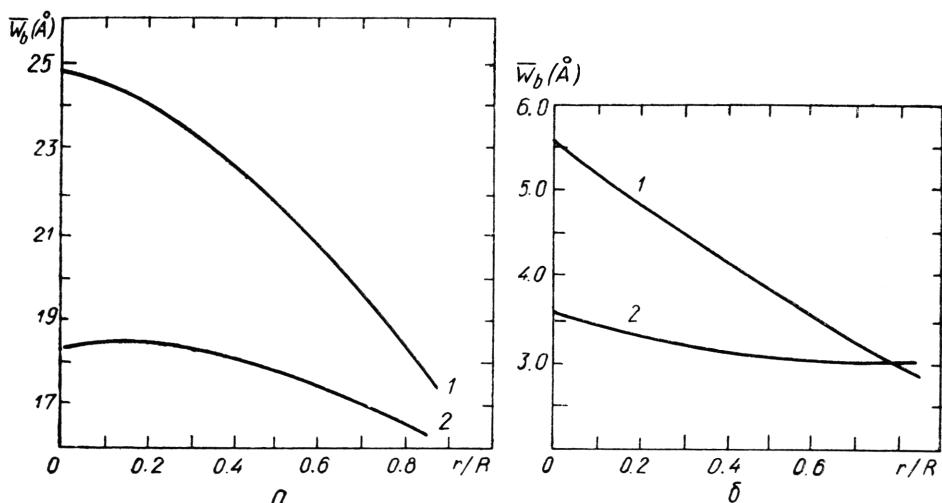


Рис. 2. Аномальное распределение в широтном направлении эквивалентной ширины полос поглощения  $\text{CH}_4$  6190 Å (а),  $\text{NH}_3$  6441+6478 Å (б) для двух дат:  
1 — 12/13 февраля 1965 г. и 2 — 23/24 марта 1966 г.

Как видно из рис. 1, интенсивности полос поглощения метана и аммиака уменьшаются от центра к краю диска. Однако для разных направлений имеются существенные различия. В экваториальной области планеты уменьшение интенсивности полос метана и аммиака в восточном (утреннем) направлении происходит сильнее, чем в западном (вечернем). Этот эффект имеет место как для эквивалентных ширин, так и для глубин полос.

В широтном направлении уменьшение интенсивности в направлении к южному полюсу происходит несколько сильнее, чем к северному.

Было установлено, что эквивалентная ширина полос  $\text{CH}_4$  6190 Å в центре диска от даты к дате меняется в пределах от 16—18 до 23—25 Å, т. е. вариации составляют почти 40%. Для краевых областей вариации существенно меньше и составляют 10—15%. Поэтому, как правило, при усилении поглощения в центре диска наблюдается более резкий спад интенсивности полос как в широтном, так и в долготном направлениях. И наоборот, при уменьшении поглощения в центре диска эффект центр — край менее выражен. Аналогичную картину мы имеем и для полос  $\text{NH}_3$  6441 и 6478 Å, хотя вариации их интенсивности в центре диска несколько больше, чем для  $\text{CH}_4$  6190 Å, и составляют 45—50%. На рис. 2 для двух дат представлены экстремальные случаи кратковременных вариаций  $W_b$  и соответствующих им распределений (в широтном направлении) поглощения по диску для полос  $\text{CH}_4$  6190 Å и  $\text{NH}_3$  6441+6478 Å соответственно.

Отметим, что усиление или ослабление молекулярного поглощения наблюдается одновременно как для метана, так и для аммиака.

Этот результат представляет, по-видимому, особый интерес для выяснения возможных причин кратковременных вариаций интенсивности молекулярных полос.

Для изучения общих закономерностей распределения поглощения в полосах  $\text{CH}_4$  6190 Å и  $\text{NH}_3$  6441+6478 Å по диску Юпитера использовались спектрограммы, полученные при ориентации щели спектрографа вдоль экватора и центрального меридиана планеты. Поскольку края спектрограммы, которым в этих случаях соответствуют краевые области диска планеты, чаще всего бывают недодержанными, то из-за влияния трудно поддающихся учету систематических погрешностей можно получить заведомо ложные результаты. Поэтому мы дополнительно получили отдельные спектрограммы (с нормальной плотностью почернения) E- и W-лимбов и S- и N-полярных областей диска Юпитера. Другими деталями на диске Юпитера, которые специально исследовались, являются S- и N-тропические полосы ( $\text{ST}_r\text{B}$ ,  $\text{NT}_r\text{B}$ ) и экваториальная светлая зона (EZ). Средние значения  $\bar{W}_b$  и  $1-\bar{R}_b$  полос  $\text{CH}_4$  6190 Å и  $\text{NH}_3$  6441+6478 Å для всех указанных выше образований даны в табл. 1, где указаны также средние квадратичные погрешности  $\sigma_W$ ,  $\sigma_R$  и количество измерений  $n$ .

Таблица 1

Деталь	$\text{CH}_4$					$\text{NH}_3$				
	$\bar{W}_b$	$\sigma_W$	$1-\bar{R}_b$	$\sigma_R$	$n$	$\bar{W}_b$	$\sigma_W$	$1-\bar{R}_b$	$\sigma_R$	$n$
S (полюс)	14.8	3.1	0.163	0.060	50	2.84	0.96	0.060	0.024	41
ST <sub>r</sub> B	20.9	3.0	0.221	0.025	46	9.26	1.09	0.091	0.030	39
EZ	20.3	2.5	0.211	0.023	45	5.33	1.03	0.095	0.029	39
NT <sub>r</sub> B	19.2	2.7	0.202	0.027	51	4.57	0.80	0.087	0.015	43
N (полюс)	15.7	3.1	0.171	0.030	55	3.53	1.04	0.066	0.017	50
E (лимб)	14.8	3.1	0.162	0.039	28	2.90	1.13	0.057	0.021	30
W (лимб)	16.4	3.8	0.176	0.036	32	3.70	1.00	0.063	0.021	32

На основании табл. 1 можно сделать заключение, что в случае полосы  $\text{CH}_4$  6190 Å заметного различия в поглощении между рассматриваемыми участками не наблюдается. Можно лишь отметить усиление поглощения в молекулярных полосах аммиака для ST<sub>r</sub>B.

Теперь перейдем к изложению основных результатов фотоэлектрических спектральных наблюдений отдельных деталей на диске Юпитера, которые были предприняты с целью изучения наиболее слабых полос поглощения в атмосфере планеты.

Детальное описание аппаратуры, методики измерений и обработка наблюдений дано в работах Л. А. Бугаенко и др. [10, 11]. Здесь отметим лишь, что измерения проводились с помощью дифракционного монохроматора, установленного в фокусе Нэсмита 122-сантиметрового рефлектора Крымской астрофизической обсерватории (спектральное разрешение  $\sim 9$  Å). Для исключения фраунгоферовых и теллурических линий использовались записи спектра Солнца на тех же зенитных расстояниях и с тем же разрешением, что и для Юпитера. Ослабление потока при наблюдении Солнца осуществлялось с помощью диафрагмы Гартмана и магниевого экрана, установленного вместо кассегреновского зеркала, что позволило получить записи солнечного спектра, усредненного по всему диску. Такой метод наблюдений позволял с большой точностью исключать фраунгоферовы линии, что в свою очередь обеспечило возможность надежно измерять очень слабые молекулярные полосы.

Наблюдения проводились в 1969 и 1970 гг., причем в 1969 г. измерялась часть диска Юпитера, вырезаемая щелью, ориентированной вдоль центрального меридиана. В 1970 г. входная щель была заменена на круглой диафрагмой, что позволило проводить измерения отдельных деталей диска планеты. В спектральной области 5000—7500 Å измерялось восемь деталей диска: центр, западная (W) и восточная (E) области для EZ и NEB, южный и северный полюсы, Красное пятно. При этом размер диафрагмы был равен  $\sim 3''$ . При измерении

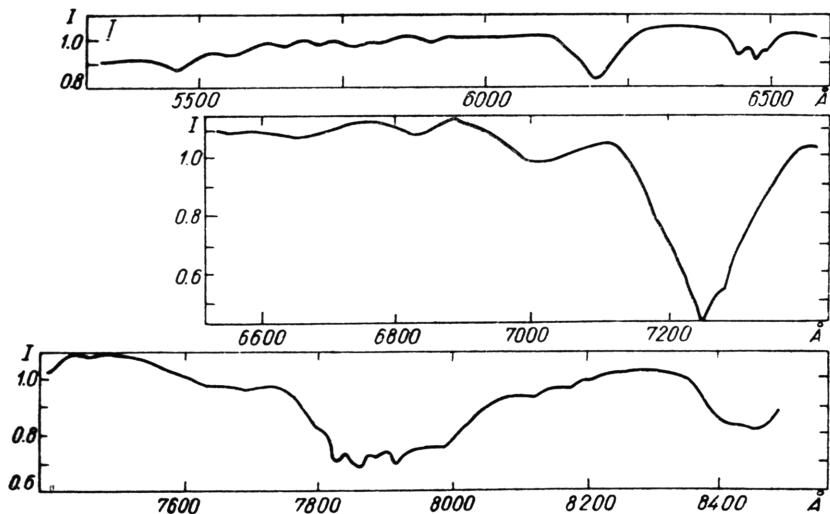


Рис. 3. Вид спектра Юпитера после исключения фраунгоферовых и теллурических линий.

Деталь	CH <sub>4</sub> 5430 Å			NH <sub>3</sub> 5520 Å			CH <sub>4</sub> 5760 Å		
	R <sub>b</sub>	W	ΔW	R <sub>b</sub>	W	ΔW	R <sub>b</sub>	W	ΔW
(1969) *	0.935	2.7	0.2	0.945	1.7	0.2	0.980	2.0	0.4
EZ (центр)	923	3.5	0.5	955	1.2	0.4	967	1.6	0.5
N (полюс)	937	3.1	1.2	973	1.4	0.5	972	2.2	0.5
S (полюс)	928	4.6	0.9	966	1.2	0.6	972	1.9	0.5
EZ (запад)	922	3.6	1.2	965	1.3	0.6	963	1.6	0.5
EZ (восток)	920	4.0	1.3	957	1.3	0.5	977	1.7	0.4
NEB (центр)	923	3.2	0.9	970	1.2	0.4	975	2.3	0.4
NEB (восток)	936	4.2	0.5	975	1.1	0.7	967	2.0	0.5
NEB (запад)	932	2.7	0.8	962	1.1	0.7	958	2.0	0.4
	930	3.4	0.8	968	1.7	0.8			

Деталь	CH <sub>4</sub> 6660 Å			CH <sub>4</sub> 6860 Å			CH <sub>4</sub> 7020 Å		
	R <sub>b</sub>	W	ΔW	R <sub>b</sub>	W	ΔW	R <sub>b</sub>	W	ΔW
(1969) *	0.950	4.9	0.6	0.935	5.3	0.4	0.920	11.9	0.5
EZ (центр)	953	4.8	0.6	955	1.9	0.4	893	11.2	0.7
N (полюс)	946	5.2	0.9	959	1.7	0.5	893	8.80	1.1
S (полюс)	955	4.4	0.7	970	1.9	0.3	900	7.66	0.7
EZ (запад)	945	5.4	0.6	955	1.6	0.4	899	9.48	0.9
EZ (восток)	944	4.0	0.7	961	1.2	0.5	915	8.15	1.1
NEB (центр)	960	5.1	0.8	960	0.8	0.5	885	7.61	1.1
NEB (восток)	953	4.9	0.7	955	1.2	0.4	930	6.76	0.9
NEB (запад)	935	5.1	0.7	950	0.9	0.4	907	7.75	1.0

\* Наблюдения велись со щелью, фиксированной вдоль центрального меридиана.

краевых областей диафрагма устанавливалась примерно на расстоянии 0.8 радиуса от центра диска. В области спектра 7500—8500 Å измерялась только центральная область диска Юпитера диаметром  $\sim 7''$ .

На рис. 3 приведена запись спектра планеты после исключения спектра Солнца. Как видно из этого рисунка, в спектре Юпитера отчетливо выделяются ранее не исследованные полосы метана (5760, 5970, 6660, 6860 и 7020 Å) и аммиака (5520 Å).

В табл. 2 приведены средние значения эквивалентных ширин  $W$  и центральных интенсивностей  $R_b$  всех измеренных полос поглощения. Эти измерения, как и приведенные выше, показали, что величина молекулярного поглощения уменьшается при переходе от центра к краю, а различие эквивалентных ширин для EZ и NEB находится в пределах ошибок.

В области 7800—8000 Å измерена широкая депрессия, которая является результатом наложения полос поглощения метана 7830 и 7980 Å (согласно отождествлению Адела и Слайфера [19]  $4v_3+v_2$  и  $4v_3+v_4$  соответственно), а также полосы аммиака 7920 Å. По записям со средней дисперсией трудно восстановить относительный вклад каждой из этих полос и определить их интенсивность.

Большой интерес представляют результаты измерений в области полосы  $\text{NH}_3$  5520 Å. Она приведена в списке обертонов и составных частот аммиака у Герцберга [12], где дано ее отождествление ( $6v_1$ ,  $5v_1+v_3, \dots$ ). Отметим, что известные полосы аммиака 6450 Å и 7920 Å в спектре Юпитера отождествляются соответственно как ( $5v_1$ ,  $4v_1+v_3, \dots$ ) и ( $4v_1$ ,  $2v_1+2v_3, \dots$ ). Гивер и др. [25] в лабораторных условиях изменили интенсивность отдельных линий полосы  $\text{NH}_3$  5520 Å и, сравнив их с линиями полосы  $\text{NH}_3$  6450 Å, пришли к заключению, что погло-

Таблица 2

CH <sub>4</sub> 5970 Å			CH <sub>4</sub> 6190 Å			NH <sub>3</sub> 6450 Å		
$R_b$	$W$	$\Delta W$	$R_b$	$W$	$\Delta W$	$R_b$	$W$	$\Delta W$
0.940	1.7	0.2	0.825	18.8	0.4	0.920	4.6	0.2
964	1.8	0.3	804	15.9	0.3	898	5.7	0.2
962	1.8	0.3	820	13.2	0.4	920	3.8	0.3
975	1.3	0.3	816	14.8	0.5	930	4.7	0.3
965	1.5	0.5	832	13.1	0.5	931	3.6	0.6
968	1.7	0.4	825	13.5	0.6	942	3.8	0.7
968	2.0	0.4	806	16.1	0.4	895	5.9	0.3
974	1.9	0.4	816	13.5	0.4	937	4.1	0.5
960	1.4	0.4	835	13.5	0.4	910	4.9	0.5
945	2.0	0.5	815	14.2	0.7	910	6.8	1.0

Продолжение табл. 2

CH <sub>4</sub> 7250 Å			CH <sub>4</sub> +NH <sub>3</sub> 7900 Å			CH <sub>4</sub> 8400 Å		
$R_b$	$W$	$\Delta W$	$R_b$	$W$	$\Delta W$	$R_b$	$W$	$\Delta W$
0.440	59.4	0.3						
410	73.1	0.6	0.660	75.6	0.7	0.795	13.0	0.9
395	73.4	0.7						
390	75.2	0.9						
435	66.8	0.7						
425	68.7	1.2						
442	71.2	1.0						
450	67.9	1.1						
440	63.7	1.1						

щение в этой области спектра Юпитера должно быть заметным. Наши наблюдения позволили определить эквивалентную ширину полосы поглощения у  $5520 \text{ \AA}$ , среднее значение которой равно  $1.3 \text{ \AA}$ . Наблюдения Оуэна [32] с высокой дисперсией обнаруживают отдельные линии этой полосы.

### III. АБСОЛЮТНАЯ СПЕКТРОФОТОМЕТРИЯ ЮПИТЕРА

В апреле 1969 г. на 70-сантиметровом рефлекторе ГАО АН УССР Л. А. Бугаенко [7] была проведена серия наблюдений центра диска Юпитера для определения монохроматических коэффициентов яркости. В качестве приемного устройства использовалась та же аппаратура, что и при спектрофотометрии полос поглощения. Входная

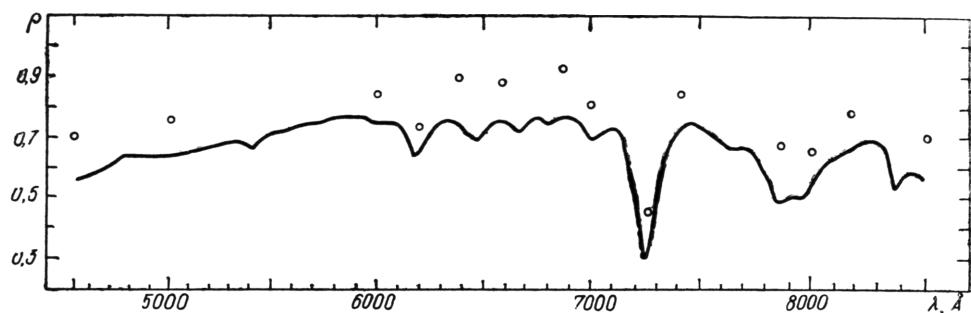


Рис. 4. Кривая абсолютных значений коэффициентов яркости центра диска Юпитера. Кружки — данные Пилчера и др. [33].

щель заменялась круглой диафрагмой, диаметр которой был равен  $0.23 \pm 0.005 \text{ мм}$ . Эта диафрагма позволила выделять на диске планеты центральную область размером  $4''.50$ . Разрешение монохроматора, определяемое размером выходной щели, составляло  $14 \text{ \AA}$ . Монохроматические коэффициенты яркости измерялись в спектральном диапазоне  $4600\text{--}8500 \text{ \AA}$ .

Для абсолютной привязки наблюдений производились записи спектра звезды с известным спектральным распределением энергии ( $\alpha$  Льва). Данные об абсолютном распределении энергии в спектре  $\alpha$  Льва взяты из работы Хейса [26]. Звезда сравнения наблюдалась на том же зенитном расстоянии, что и планета, в близком азимуте и через небольшой интервал времени (не более  $30''$ ). При такой методике наблюдений нет необходимости учитывать прозрачность земной атмосферы.

В течение одной ночи записывалось по несколько спектральных разрезов планеты и звезды сравнения и подбирались пары разрезов на одинаковых зенитных расстояниях. При вычислении абсолютных значений коэффициента яркости  $\rho$  центра диска планеты использовались средние значения отношений интенсивности полученных для нескольких пар. Для определения  $\rho$  привлекались данные об абсолютном распределении энергии в спектре Солнца, приведенные в работе Макаровой и Харитонова [15]. Эти данные представляют собой средневзвешенное из более чем тридцати независимых рядов наблюдений и являются, по-видимому, наиболее достоверными результатами из всех опубликованных до настоящего времени.

На рис. 4 представлен ход коэффициента яркости  $\rho$  с длиной волны. Для сравнения приведены измерения отражательной способности экваториальной зоны Юпитера [33]. Систематическое различие коэффициентов яркости (около 15%), слабо зависящее от длины волн,

ны, можно, очевидно, частично объяснить различием в принятой звездной величине Солнца ( $\Delta m=0^m.06$ ), а частично тем, что для привязки использовались разные стандартные звезды.

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Изучение физических характеристик атмосферы Юпитера по методам исследования распадается как бы на две отдельные задачи: 1) изучение ее газовой составляющей и 2) изучение аэрозольной составляющей. При этом вторая задача должна быть решена в первую очередь. Дело в том, что все имеющиеся к настоящему времени спектрофотометрические данные о молекулярных полосах поглощения (в том числе и приведенные выше) свидетельствуют о том, что при их формировании многократное рассеяние играет существенную роль. Поэтому для выполнения корректного количественного анализа молекулярных полос поглощения необходимо знать индикаторы рассеяния и вероятность выживания кванта в непрерывном спектре. Так как при рассеянии света в атмосфере планеты, особенно в облачном слое, доминирующую роль играет аэрозольная составляющая, то рассеивающие свойства атмосферы будут определяться в основном показателем преломления и средним радиусом аэрозольных частиц. Это одна сторона проблемы.

С другой стороны, определение показателя преломления и среднего радиуса облачных частиц представляет несомненный интерес для изучения природы облаков и динамики атмосферы.

Так как в настоящее время одним из наиболее надежных методов изучения аэрозольной составляющей атмосферы является поляриметрический метод, то в 1971 г. в ГАО АН УССР были проведены измерения степени поляризации как всего диска планеты, так и его центральной области в отдельных участках спектра интервала длин волн 3730—7980 Å. Наблюдения проводились с помощью электротометра слабых потоков (см. [9]), установленного в фокусе Кассегрена 70-сантиметрового рефлектора. Ошибка измеренных значений степени поляризации для всего диска составляла 0.05, для центра — около 0.1%.

Основные результаты этих измерений следующие.

1. Из-за неоднородности диска Юпитера поляризация всего диска планеты вблизи оппозиции не равна нулю. Причем во всем исследованном спектральном интервале поляризация положительна и величина ее заключается в пределах 0.24—0.38%. Согласно измерениям Коффина и Бейкера [23], выполненным в двух участках спектра с длинами волн 4460 и 6190 Å вблизи нулевого фазового угла, поляризация всего диска Юпитера была также положительной и находилась в пределах 0.3—0.4%. Поэтому, прежде чем наносить результаты наблюдений на график, мы их исправили за эффект неоднородности диска. Для этого мы приняли, что наблюдаемая поляризация при  $\alpha \leqslant 0^{\circ}.5$  вызвана только неоднородностью диска Юпитера, и среднее ее значение вычли из всех данных наблюдений для всех остальных углов фазы. Исправленные таким образом значения поляризации приведены на рис. 5 (светлые кружочки).

2. После исправления измеренных значений степени поляризации всего диска планеты за эффект неоднородности оказалось, что в спектральном интервале 4000—8000 Å поляризация отрицательна и увеличивается по модулю с ростом угла фазы. Максимальное значение степени поляризации по модулю не превышает 0.7%. В участках спектра с эффективной длиной волны  $\lambda=3730$  Å поляризация близка к нулю.

3. Для центра диска спектральные фазовые кривые поляризации имеют такой же вид, как и для всего диска. Максимальное значение степени поляризации также не превышает по модулю 0.7 %.

В 1973 г. была продолжена работа по изучению поляризационных свойств всего диска Юпитера и его центральной области (с диафрагмой диаметром 20"). В этот период наблюдений спектральный интервал был расширен в УФ-область спектра за счет добавления двух

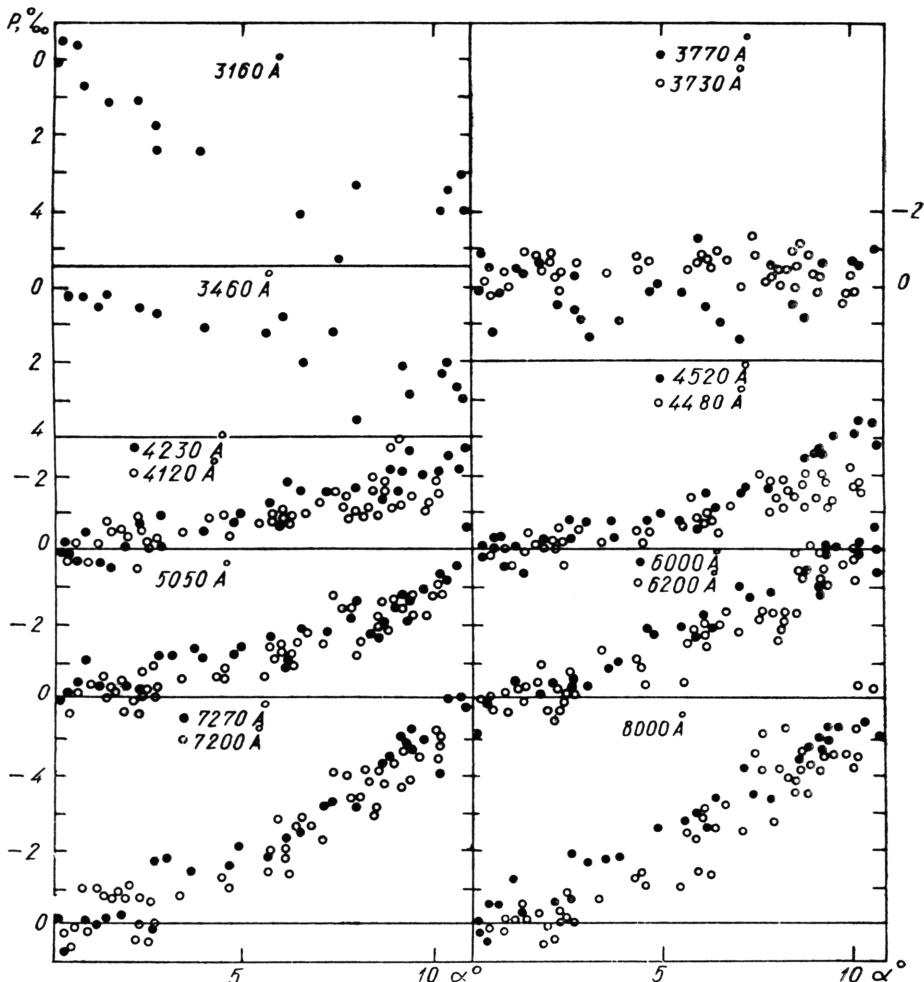


Рис. 5. Фазовые зависимости поляризации всего диска Юпитера, исправленные за эффект неоднородности диска.

Светлые кружки — наблюдения 1971 г., черные — наблюдения 1973 г.

интерференционных светофильтров с эффективными длинами волн 3160 и 3470 Å. Так как в 1973 г. Юпитер наблюдался на больших зенитных расстояниях ( $z \geq 70^\circ$ ), то уверенные измерения центра диска проводились лишь в спектральном интервале 4230—7980 Å.

Систематические измерения звезды α Лиры показали, что во всем спектральном интервале инструментальная поляризация системы электрополяриметр — телескоп находится в пределах пороговой чувствительности аппаратуры, т. е.  $P_i \leq 0.05\%$ . Ошибка измеренных значений степени поляризации составляет примерно 0.05 % для всего диска планеты и 0.1 % — для центра диска. Результаты измерений приведены на рис. 5 и 6 (черные кружочки).

Эти наблюдения подтвердили, что при малых значениях фазового угла ( $\alpha < 1^\circ$ ) поляризация всего диска планеты не равна нулю. Поэтому, как и в 1971 г., данные измерений для всего диска (рис. 5) исправлены за эффект неоднородности диска.

Наблюдения 1973 г. позволили получить уверенные данные о зависимости поляризации всего диска планеты от угла фазы в двух ранее не исследованных участках спектра с  $\lambda = 3160$  и  $3470 \text{ \AA}$ . Оказа-

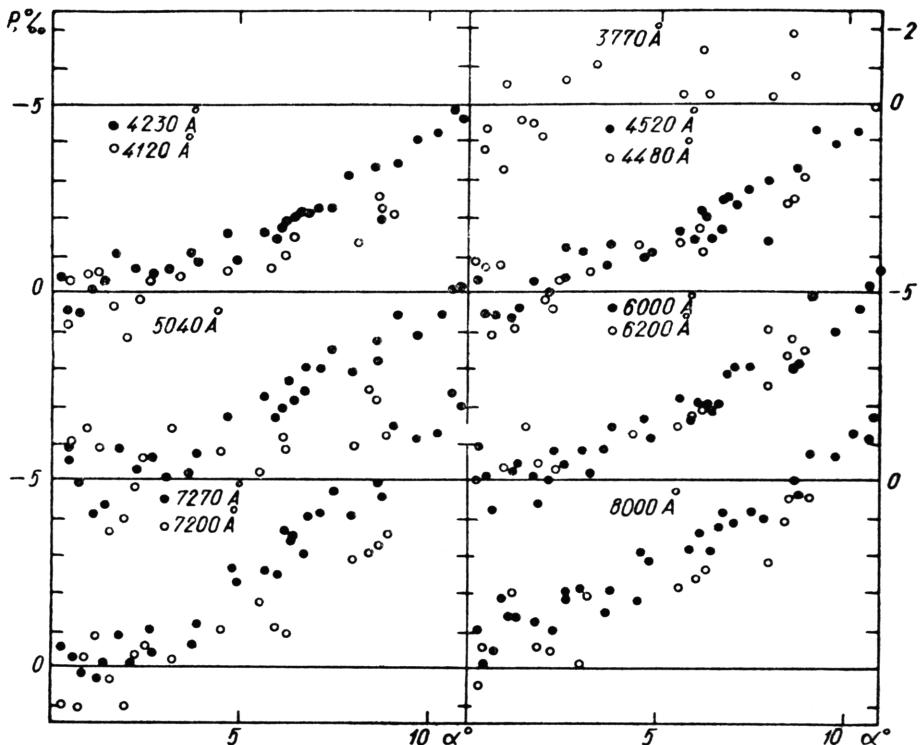


Рис. 6. Фазовые зависимости поляризации диска Юпитера.  
Светлые кружки — наблюдения 1971 г., черные — наблюдения 1973 г.

лось, что в этих участках поляризация положительна во всем интервале фазовых углов. Кроме того, при сравнении наблюдений 1971 и 1973 гг. (см. рис. 5 и 6) обнаружено, что во всех участках спектра интервала длин волн  $3730$ — $7980 \text{ \AA}$  фазовые кривые поляризации как всего диска, так и его центральной области практически совпадают между собой для двух периодов наблюдений. Это свидетельствует о том, что физические характеристики атмосферного аэрозоля в эти периоды оставались практически неизменными.

В заключение отметим, что основные результаты наших наблюдений поляризации Юпитера уже опубликованы [16], [31], [20], [17].

#### V. НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ПОЛУЧЕННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

В работе Мороженко и Яновицкого [31] проведен анализ поляриметрических измерений Юпитера 1971 г. (см. Мороженко [16], а также рис. 5 и 6) и определены значения действительной части показателя преломления  $n_r$  и среднего радиуса частиц облаков Юпитера. Рассматривались две модели атмосферы Юпитера.

**Модель А.** Атмосфера планеты представляет собой полубесконечный однородный газово-аэрозольный слой. Роль газовой составляющей при рассеянии света в этом слое характеризуется параметром  $\beta = \sigma_g / (\sigma_g + \sigma_a)$ , где  $\sigma_g$  и  $\sigma_a$  — объемные коэффициенты рассеяния газа и аэрозоля соответственно.

**Модель В.** Над полубесконечным чисто аэрозольным слоем ( $\beta = 0$ ) расположен слой малой оптической толщины  $\tau_0$ .

Кроме того, предполагалось, что частицы аэрозоля представляют собой однородные непоглощающие шары, распределенные по размерам согласно нормальному-логарифмическому закону:

$$f(r) \sim \exp[-\ln^2(r/r_0)/2\sigma^2], \quad (1)$$

где  $r_0$  — среднее геометрическое радиусов частиц, а  $\sigma^2$  — их дисперсия.

В дальнейшем для анализа были привлечены также наблюдения 1973 г. (см. [7], а также рис. 5 и 6). В результате было получено, что  $n_r = 1.36 \pm 0.01$ ,  $r_0 \approx 0.2 \text{ мкм}$ ,  $\sigma^2 \approx 0.3$ ,  $\beta \approx 0.3$  (для модели А) и  $\tau_0 \approx 0.15$  (для модели В). Значения  $\beta$  и  $\tau_0$  приведены для  $\lambda = 3730 \text{ \AA}$ . Полученное значение совпадает с показателем преломления жидкого аммиака при температуре  $T = 200 \pm 20^\circ \text{K}$  [30].

Отметим, что сходное значение среднего радиуса облачных частиц Юпитера ранее было получено Аврамчуком [4] ( $0.15 \leq r_0 \leq 0.2 \text{ мкм}$ ) на основании анализа поведения полосы поглощения  $\text{CH}_4$   $6190 \text{ \AA}$  по диску планеты (см. «Введение» настоящей статьи), а также Лоскутовым [14] ( $r_0 \approx 0.3 \text{ мкм}$ ) из поляризационных наблюдений Лио [29].

Интересно сопоставить значение оптической толщины  $\tau_0$  надоблачной атмосферы Юпитера (модель В) с данными Коффина [22], который по результатам «Пионер-10» для угла фазы  $\alpha = 103^\circ$  и длины волны  $\lambda = 4400 \text{ \AA}$  нашел  $\tau_0 = 0.03 - 0.09$ . Согласно нашим оценкам, для этой же длины волны имеем  $\tau_0 \approx 0.08$ .

В работе Яновицкого [18] была получена формула, связывающая толщину  $\tau_0$  надоблачной чисто газовой атмосферы с давлением  $P_0$  на границе облачного слоя:

$$P_0 = \frac{N_A g \lambda^4 \tau_0}{24 \pi^3 s^2 \mu}, \quad (2)$$

где  $N_A$  — число Авогадро,  $g$  — ускорение силы тяжести,  $\mu$  — молекулярный вес,  $s$  — удельная рефракция газа. Принимая, как Клиор и др. [28], для объемной концентрации  $\text{H}_2$  и  $\text{He}$  в атмосфере соответственно 85% и 15% и учитывая, что для  $\text{H}_2$   $s = 1.03 \text{ см}^3/\text{г}$ , а для  $\text{He}$   $s = 0.127 \text{ см}^3/\text{г}$ , получаем для Юпитера

$$P_0 = 3 \left( \frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^4 \tau_0(\lambda), \quad (3)$$

где  $\lambda_0 = 4000 \text{ \AA}$ , а давление  $P_0$  выражается в атмосферах. Если согласно приведенным выше оценкам принять для  $\lambda = 4000 \text{ \AA}$   $0.03 \leq \tau_0 \leq 0.1$ , то из (3) получаем, что на границе облачного слоя  $0.1 \leq P_0 \leq 0.3 \text{ atm}$ .

Обычно оцениваемые эффективные давления на уровне формирования полос поглощения в атмосфере Юпитера существенно превышают эту величину. Следовательно, все полосы поглощения в видимой и инфракрасной области спектра формируются преимущественно в облачном слое планеты. Таким образом, приведенные выше данные об оптических свойствах аэрозоля позволяют достаточно коррект-

но проводить расчеты не только в области непрерывного спектра планеты, но и в полосах поглощения.

Чемберлен [21] определил среднюю оптическую глубину формирования полос поглощения в изотропно рассеивающей атмосфере следующим образом:

$$\tau_e = \frac{\int_0^{\infty} (1 - \omega) B(\tau, \mu_0) \tau d\tau}{\int_0^{\infty} (1 - \omega) B(\tau, \mu_0) d\tau}, \quad (4)$$

где  $\omega$  — альбедо частиц при однократном рассеянии,  $B(\tau, \mu_0)$  — функция источника,  $\arccos \mu_0$  — угол падения излучения на верхнюю границу атмосферы. Он также нашел, что при  $\omega \rightarrow 1$

$$\tau_e \rightarrow [3(1 - \omega)]^{-1/2}. \quad (5)$$

Обобщив формулу (4) на случай анизотропно рассеивающей атмосферы, один из авторов настоящего обзора (Яновицкий) получил следующее выражение:

$$\tau_e = \frac{3}{3 - \omega x_1} \frac{\mu_0 + 2 \int_0^1 \rho(\mu, \mu_0) \mu^2 d\mu}{1 - 2 \int_0^1 \rho(\mu, \mu_0) \mu d\mu}, \quad (6)$$

где  $\rho(\mu, \mu_0)$  — усредненный по азимуту коэффициент отражения атмосферы для излучения, выходящего под углом  $\arccos \mu$  к внешней нормали,  $x_n (n=1, 2, 3, \dots)$  — коэффициенты разложения индикатрисы рассеяния в ряд по полиномам Лежандра. Из (5) при  $(1 - \omega) \ll 1$  вытекает следующая асимптотическая формула:

$$\tau_e = [(1 - \omega)(3 - x_1)]^{-1/2} + \frac{15}{4(5 - x_2)} \frac{v_0(\mu_0)}{u_0(\mu_0)} + O[(1 - \omega)^{1/2}], \quad (7)$$

где

$$u_0(\mu_0) = \frac{3}{4} [\mu_0 + 2 \int_0^1 \rho_0(\mu, \mu_0) \mu^2 d\mu], \quad (8)$$

$$v_0(\mu_0) = \mu_0^2 - 2 \int_0^1 \rho_0(\mu, \mu_0) \mu^3 d\mu, \quad (9)$$

а через  $\rho_0(\mu, \mu_0)$  обозначена функция  $\rho(\mu, \mu_0)$  при  $\omega = 1$ . Таблицы функций  $u_0(\mu_0)$  и  $v_0(\mu_0)$  для индикатрисы рассеяния Хенни — Гринстейна даны в работе Дlugач и Яновицкого [24]. Из таблиц, в частности, следует, что при  $0.4 \leq \mu_0 \leq 1$  функции  $u_0(\mu_0)$  и  $v_0(\mu_0)$  очень слабо зависят от вида индикатрисы рассеяния, и для этого интервала  $\mu_0$  можно использовать данные для изотропного рассеяния. В таком

случае для  $0.4 \leq \mu_0 \leq 1$  вместо (7) получаем приближенное выражение:

$$\tau_e = [(1-\omega)(3-x_1)]^{-1/2} + \frac{5}{5-x_2} [\mu_0 - q(\infty)] + O[(1-\omega)^{1/2}], \quad (10)$$

где  $q(\infty) = 0.710446\dots$  — постоянная Хопфа.

Выражение (10) качественно объясняет поведение эквивалентной ширины  $W_b$  полос поглощения по диску планеты (см. раздел II настоящей статьи). Действительно, величина  $\tau_e$  определяется числом поглощающих молекул в эффективном слое, от которого, в свою очередь, зависит эквивалентная ширина рассматриваемой полосы поглощения. Для очень слабых полос ( $\omega \rightarrow 1$ ), как следует из (10),  $W_b$  не зависит от  $\mu_0$ . В этом случае наблюдения не показывают зависимости  $W_b$  от положения на диске Юпитера. Для более сильных полос поглощения наблюдается уменьшение  $W_b$  к краю диска планеты (см. рис. 1), как это и должно быть согласно формуле (10). В этом смысле показателен рисунок 2. Как мы видим, при резком уменьшении  $W_b$  в центре диска планеты, зависимость эквивалентной ширины от  $\mu_0$  становится существенно менее выраженной.

Отметим также, что Л. А. Бугаенко [8], используя формулу (10), определила содержание метана на луче зрения в эффективном слое атмосферы Юпитера. Для полос поглощения 7250 Å и 8600 Å эти величины равны соответственно 74 и 73 м·атм. При этом использовалась модель однородной анизотропно рассеивающей атмосферы. Степень анизотропии учитывалась по данным поляриметрических исследований Юпитера, приведенным выше.

Таблица 3

$\lambda_{\mu}$	$A_g$	$\omega$	$A_s$
0.359	0.292	0.918	0.398
0.393	0.344	0.958	0.486
0.416	0.422	0.981	0.596
0.457	0.454	0.985	0.638
0.501	0.488	0.995	0.737
0.626	0.550	0.998	0.821
0.730	0.418	0.992	0.672
0.860	0.301	0.977	0.512
1.064	0.286	0.974	0.488

пределения частиц по размерам (1). Принималось  $r_0 = 0.19 \text{ мкм}$ ,  $\sigma^2 = 0.3$  и  $\beta = 0.3$  (для  $\lambda = 3730 \text{ Å}$ ). Расчет производился методом, который описан в работе Дlugач и Яновицкого [13].

Используя наблюдавшиеся спектральные значения геометрического альбедо Юпитера, приведенные в работе Ирвина и др. [27], и расчеты Дlugач и Яновицкого [13], легко вычислить значения  $\omega$  и  $A_s$ . Результаты этих вычислений приведены в табл. 3.

Из табл. 3 следует, что для  $\lambda = 6260 \text{ Å}$  фазовый интеграл  $q = A_s/A_g$  оказывается равным 1.49. Интересно отметить, что, согласно расчетам Томашко и др. [34] (примерно для этой же эффективной длины волны) по данным «Пионер-10», величина  $q$  заключена в пределах 1.47—1.57.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Аврамчук В. В. Результаты спектрофотометрии полосы поглощения метана 6190 Å на диске Юпитера. — Астрон. циркуляр, 1967, № 449, 1.
2. Аврамчук В. В. О распределении поглощения метана в полосе 6190 Å по диску Юпитера. — Астрометрия и астрофизика, 1968, вып. 1, 126.

3. Аврамчук В. В. Спектрофотометрия полос поглощения  $\text{NH}_3$  6441 Å и 6478 Å в атмосфере Юпитера. — Астрон. циркуляр, 1968, № 483, 5.
4. Аврамчук В. В. Определение оптических параметров атмосферы Юпитера. — Астрон. циркуляр, 1968, № 484, 4.
5. Аврамчук В. В. О результатах спектрофотометрии полос поглощения метана (6190 Å) и аммиака (6441 Å и 6478 Å) на диске Юпитера. — Астрон. журнал, 1970, 47, 577.
6. Аврамчук В. В. Результаты трехгодичных наблюдений полос поглощения метана (6190 Å) и аммиака (6441 Å и 6478 Å) на диске Юпитера. — В кн.: Физика Луны и планет. «Наука», М., 1972, 439.
7. Бугаенко Л. А. Монохроматические коэффициенты яркости планет-гигантов. — Астрон. вестник, 1972, 6, 19.
8. Бугаенко Л. А. Определение содержания метана в атмосферах планет-гигантов. — Астрометрия и астрофизика, 1976, вып. 29.
9. Бугаенко Л. А., Бугаенко О. И., Круглов В. Д., Парусимов В. Г. Электрофотометр слабых потоков. — Астрометрия и астрофизика, 1968, вып. 1, 193.
10. Бугаенко Л. А., Галкин Л. С., Мороженко А. В. Спектрофотометрические наблюдения планет-гигантов. — Астрон. журнал, 1971, 48, 602.
11. Бугаенко Л. А., Галкин Л. С., Мороженко А. В. Исследование молекулярного поглощения в атмосферах планет-гигантов. — Астрон. вестник, 1972, 6, 223.
12. Герцберг Г. Колебательные и вращательные спектры многоатомных молекул. ИЛ, М., 1949.
13. Дlugач Ж. М., Яновицкий Э. Г. Расчет фотометрических характеристик атмосферы Юпитера. — Астрометрия и астрофизика, 1974, вып. 21, 46.
14. Лоскутов В. М. Интерпретация поляриметрических наблюдений Юпитера. — Астрон. журнал, 1971, 48, 1046.
15. Макарова Е. А., Харитонов А. В. Средние данные об абсолютном распределении энергии в спектре Солнца в области от 1800 Å до 4 м.м. — Астрон. журнал, 1968, 45, 752.
16. Мороженко А. В. Поляриметрические наблюдения планет-гигантов. III. Юпитер. — Астрон. журнал, 1973, 50, 163.
17. Мороженко А. В. Результаты поляризационных исследований Юпитера. — Астрометрия и астрофизика, 1976, вып. 30, 47.
18. Яновицкий Э. Г. Об аэрозольной составляющей атмосферы Марса. — В сб.: Вопросы астрофизики. «Наукова думка», Киев, 1965, 82.
19. Adel A., Slipher V. M. On the identification of the methane bands in the Solar spectra of the major planets. — Phys. Rev., 1934, 46, 240 L.
20. Bugaenko O. I., Morozhenko A. V., Yanovitskij E. G. Polarization investigations of the planets carried out at the Main Astronomical observatory of the Ukrainian Academy of Sciences. Planets, stars and nebulae studied with photopolarimetry. (T. Gehrels, ed.), Tucson, Arizona. Univ. of Arizona Press, 1974, 599.
21. Chamberlain J. W. The atmosphere of Venus near cloud tops. — Astrophys. J., 1965, 141, 1184.
22. Coffeen D. L. Optical polarization measurements of the Jupiter atmosphere at 103° phase angle. — J. Geophys. Res., 1974, 79, 3645.
23. Coffeen D. L. Discussion to report of Bugaenko O. I., Morozhenko A. V., Yanovitskij E. G. Planets, stars and nebulae studied with photopolarimetry. (T. Gehrels, ed.), Tucson, Arizona, Univ. of Arizona Press, 1974, 606.
24. Dlugach J. M., Yanovitskij E. G. The optical properties of Venus and Jovian planets. II. Method and results of calculations of the intensity of radiation diffusely reflected from semi-infinite homogeneous atmospheres. — Icarus, 1974, 22, 56.
25. Giver L. P., Boese R. W., Miller J. H. Laboratory studies of the visible  $\text{NH}_3$  bands with applications to Jupiter. — J. Atm. Sci., 1969, 26, 941.
26. Hayes D. S. An absolute spectrophotometric calibration of the energy distribution of twelve standard stars. — Astrophys. J., 1970, 159, 165.
27. Irvine W. M., Simon T., Menzel D. H., Piccos C., Young A. T. Multicolor photoelectric photometry of brighter planets. — III. Observations from Boyden Observatory. — Astron. J., 1968, 73, 807.
28. Kliore A., Cain D. L., Ejeldbo G., Seidel B. L. Preliminary results on the atmospheres of Io and Jupiter from Pioneer-10 S-band occultation experiments. — Science, 1974, 183, 323.
29. Lyot B. Recherches sur le polarisation de la lumiere des planete et de quelques substances terrestres. — Ann. Obs. Paris (Meudon), 1929, 8, 1.
30. Marcoux L. E. Indices of refraction of some gases in the liquid and solid state. — J. Opt. Soc. Amer., 1969, 59, 998.
31. Morozhenko A. V., Yanovitskij E. G. The optical properties of Venus and the Jovian planets. I. The atmosphere of Jupiter according to polarimetric observations. — Icarus, 1973, 18, 583.
32. Owen T. The 5520 Å band of ammonia in the spectrum of Jupiter. — Astrophys. J., 1971, 164, 211.

33. Pilcher C. B., Prinn R. G., McCord T. B. Spectroscopy of Jupiter: 3200 to 11200 Å. — J. Atm. Sci., 1973, 30, 302.  
34. Tomasko M. G., Clements A. E., Castillo N. D. Limb darkening of two latitudes of Jupiter at phase angles of 34° and 109°. — J. Geophys. Res., 1974, 79, 3653.

Главная астрономическая  
обсерватория АН УССР

Поступила в редакцию  
в июне 1975 г.

V. V. AVRANCHUK, L. A. BUGAENKO,  
A. V. MOROZHENKO, E. G. YANOVITSKIJ

RESULTS OF STUDIES OF JUPITER  
OBTAINED AT THE MAIN ASTRONOMICAL  
OBSERVATORY OF THE UKRAINIAN ACADEMY OF SCIENCES

Summary

The paper deals with a review of spectrophotometric and polarimetric investigations carried out at the Main Astronomical Observatory. Using the extensive measurements of the methane (6190 Å) and ammonia (6450 Å) absorption bands, the variations in the absorption over the planetary disk as well as its time variations were studied. The molecular absorption in weak bands of methane (5430, 5760, 5970, 6660, 6860 and 7020 Å) and ammonia (5520 Å) was examined. The brightness coefficients of the planetary disk at  $\lambda$  4600—8500 Å are determined. The reliable data on dependence of polarization upon the phase angle are obtained for different spectral regions at  $\lambda$  3160—7980 Å for both the whole planetary disk and its centre. The real part of the refractive index ( $n_r = 1.36 \pm 0.01$ ), mean radius of particles ( $r_0 \approx 0.2\mu$ ) and size dispersion ( $\sigma^2 \approx 0.30$ ) are determined for the Jovian cloud layer. For this model the spherical albedo at different wavelengths was calculated from the observed geometrical albedo. In particular, the phase integral for  $\lambda$  6260 Å was found to be 1.49. The atmospheric pressure  $P_0$  at the boundary of a cloud layer ( $0.1 \leq P_0 \leq 0.3$  atm) was estimated. The asymptotic formula is given for estimating effective optical depth of the absorption band formation in a cloudy atmosphere.

УДК 523.035.2

Ж. М. Длугач

**РАСЧЕТ ПОЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ  
В ОДНОРОДНОЙ ПОЛУБЕСКОНЕЧНОЙ АТМОСФЕРЕ  
ПРИ ИЗОТРОПНОМ РАССЕЯНИИ**

При решении задач переноса излучения в рассеивающих средах значительный интерес представляет расчет поля излучения внутри атмосферы. Эта задача давно уже интересует физиков и геофизиков, которые разработали для ее численного решения ряд методов. В последнее время в связи с проведением оптического зондирования атмосферы Венеры эта задача приобрела важное значение и в астрофизике.

Изучение внутреннего поля излучения, по-видимому, лучше всего начать с самого простого случая, а именно, с рассмотрения однородной полубесконечной плоской атмосферы. По мере углубления в такую среду характер поля излучения постепенно упрощается, и на больших оптических глубинах ( $\tau \geq \tau_{as} \gg 1$ ) наступает некоторый асимптотический режим, свойства которого хорошо изучены (см. [3]). Гораздо сложнее провести расчет поля излучения на оптических глубинах  $\tau < \tau_{as}$ , т. е. в некотором пограничном слое. Так как возможно только численное решение поставленной задачи, то очень важно, чтобы оно проводилось максимально простым методом. Лэкис и Хансен