

УДК 523.481—852

А. В. Мороженко

Главная астрономическая обсерватория НАН Украины  
03680, Киев, ул. Заболотного 27

### Переопределение значений монохроматических коэффициентов поглощения метана с учетом тепловых режимов планет-гигантов.

#### I. Полоса поглощения на $\lambda = 619$ нм

*Предложено принципиально новый метод уточнения характера изменения с длиной волны значений монохроматических коэффициентов поглощения метана  $k_\nu$  в контурах полос поглощения. Он базируется на использовании графических зависимостей  $\ln NL/\tau_s$  от  $\ln NL$  ( $NL$  — количество метана и  $\tau_s$  — рассеивающая составляющая оптической толщины на эффективной глубине формирования диффузно отраженного излучения в полубесконечной атмосфере), которые строятся непосредственно по спектрофотометрическим измерениям планет-гигантов. Как исходные были приняты данные лабораторных определений  $k_\nu(\lambda)$  в полосе поглощения метана  $\lambda = 619$  нм при температурах 290, 200, 150, 125 и 100 К. В предположении, что  $k_\nu(\lambda)$  изменяется с температурой по закону  $k_\nu(\lambda, T) = k_\nu(\lambda, 290)(T/290)^{n(\lambda)}$ , были определены значения параметра  $n(\lambda)$ , а также значения  $k_\nu(\lambda)$  для Юпитера (равновесная температура 125 К), Сатурна (96.2 К), Урана и Нептуна (58.7 К).*

**ПЕРЕВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИН МОНОХРОМАТИЧНИХ КОЕФІЦІЕНТІВ ПОГЛИНАННЯ МЕТАНУ З УРАХУВАННЯМ ТЕПЛОВИХ РЕЖИМІВ ПЛАНЕТ-ГІГАНТІВ. I. СМУГА ПОГЛИНАННЯ НА  $\lambda = 619$  нм, Мороженко О. В. — Запропоновано принципово новий метод уточнення характеру зміни з довжиною хвилі значень монохроматичних коефіцієнтів поглинання метану  $k_\nu$  в контурах смуг поглинання. Він базується на використанні графічних залежностей  $\ln NL/\tau_s$  від  $\ln NL$  ( $NL$  — кількість метану,  $\tau_s$  — розсіююча складова оптичної товщини на ефективній глибині формування дифузно відбитого випромінювання в напівнескінченній атмосфері), які будуються безпосередньо за даними спектрофотометричних спостережень планет. Висхідними були взяті дані лабораторних визначень  $k_\nu(\lambda)$  в смузі поглинання метану  $\lambda = 619$  нм при температурах 290, 200, 150, 125 і 100 К. В допущенні, що  $k_\nu(\lambda)$  змінюється з температурою за законом  $k_\nu(\lambda, T) = k_\nu(\lambda, 290)(T/290)^{n(\lambda)}$ , були визначені**

значення параметра  $n(\lambda)$ , а також  $k_v(\lambda)$  для Юпітера (рівноважна температура 125 К), Сатурна (96.2 К), Урана й Нептуна (58.7 К).

*REDETERMINATION OF MONOCHROMATIC ABSORPTION COEFFICIENTS OF METHANE WITH REGARD TO THE THERMAL CONDITIONS IN THE ATMOSPHERES OF GIANT PLANETS. I. ABSORPTION BAND AT  $\lambda$  619 NM, by Morozhenko O. V. — We propose a fundamentally new method for defining more exactly the wavelength dependence of the monochromatic absorption coefficients  $k_v$  in methane absorption bands. The method is based on the  $\ln NL/\tau_s - \ln NL$  plots constructed directly from spectrophotometric observations of planets ( $NL$  is the methane amount and  $\tau_s$  is the scattering component of optical thickness at the effective depth of formation of diffusely reflected radiation in a semi-infinite atmosphere). The observation data were compared to laboratory determinations of  $k_v(\lambda)$  in the methane absorption band at  $\lambda$  619 nm at temperatures of 290, 200, 150, 125, and 100 K. On the assumption that  $k_v(\lambda)$  varies with temperature as  $k_v(\lambda, T) = k_v(\lambda, 290)(T/290)^{n(\lambda)}$  we determined the parameter  $n(\lambda)$  as well as the coefficient  $k_v(\lambda)$  for Jupiter (equilibrium temperature of 125 K), Saturn (96.2 K), Uranus, and Neptune (58.7 K).*

Корректность анализа спектрофотометрических измерений, в том числе и с целью определения относительной концентрации газов или построения модели вертикальной структуры аэрозольной составляющей атмосферы, требует точных значений монокроматических коэффициентов поглощения газов  $k_v$  при соответствующих температурах. Для планет-гигантов это в первую очередь относится к метану и к равновесным температурам 58.7 К для Урана и Нептуна [10, 17], 96.2 К для Сатурна [15] и 125 К для Юпитера [9]). К сожалению, достоверных данных о  $k_v$  сейчас нет даже для комнатной температуры 290 К (см. табл. 1 и рис. 1). Особенно большое расхождение наблюдается для очень слабых полос поглощения и крыльев контуров сильных полос. Более того, в отдельных публикациях даже для центра полосы поглощения приводятся разные длины волн. (Здесь и в последующем значения  $k_v$  приведятся усредненными в интервале длин волн 1 нм).

Для уточнения полученных в лабораторных условиях значений [6] монокроматического коэффициента поглощения метана Каркошка и Томаско [12] предложили метод, который базируется на анализе наблюдательных данных о спектральных значениях геометрического альбедо планет-гигантов. Исходя из многочисленных модельных расчетов, они предложили

Таблица 1. Значения  $\ln k_v$  ( $k_v$  — в км-амагат<sup>-1</sup>) в центрах полос поглощения метана

$\lambda$ , нм	[7]	[8]	[13, 14]
441	-4.51	-4.72	
460	-4.83	-5.19	
485	-3.51	-3.03	-3.22
510	-4.14	-4.50	
522	-3.73	-5.81	
543	-2.04	-2.10	-2.10
576	-2.96	-3.37	-3.31
596	-2.73	-3.72	
619	-0.43	-0.51	-0.60
702	-1.39	-1.32	-1.28
727	+1.19	+1.33	+1.31
842	-0.43	-0.22	
864	+1.55	+1.61	
887	+3.43	+3.44	

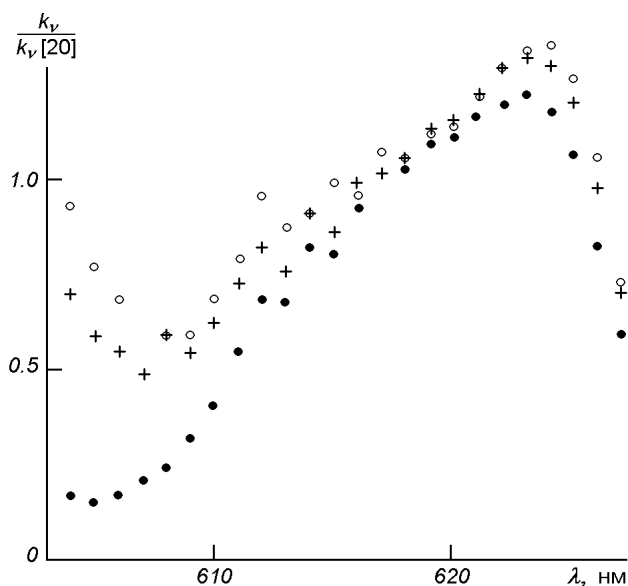


Рис. 1. Отношение значений  $k_v$ , по данным работы [20] и значений, полученных в работах [7] (кружки), [11] (точки), [16] (крестики)

делать это с помощью эмпирического выражения

$$k_v = 0.458 [(A_c/A_v)^{1.17} - 1] A_v^{-2}. \quad (1)$$

Здесь  $A_c$  и  $A_v$  — значения геометрического альbedo в непрерывном спектре и в контурах полос поглощения метана. Здесь предполагалось, что для указанных выше планет-гигантов монохроматические коэффициенты поглощения имеют одинаковые значения, поэтому полученные для каждой из планет оценки  $k_v$  усреднялись [11]. Поскольку в соответствии с данными лабораторных исследований [8] для  $\lambda > 400$  нм практически нет участков, свободных от поглощения метана, то и в спектральном распределении геометрического альbedo планет-гигантов в этом диапазоне нет непрерывного спектра  $A_c$ . Это одно из слабых мест названного метода. Убедительное доказательство ошибочности значений  $k_v$  [11], во всяком случае в крыльях полос поглощения, было получено при изучении различия вертикальных структур облачных слоев атмосфер планет-гигантов [5]. Поэтому ниже постараемся обосновать принципиально новый метод уточнения спектральных значений  $k_v$  на тепловой режим планет, который также базируется на экспериментальных значениях  $A_g(\lambda)$ .

Для этого будем использовать метод отклонения вертикальной структуры облачного слоя от условия однородности [1]. Не касаясь деталей, напомним только, что он состоит в построении графической зависимости  $\ln(Nl/\tau_s)$  от  $\ln Nl$  в контурах различных полос поглощения метана. Здесь  $Nl$  — количество метана на луче зрения в км-амагат, а  $\tau_s$  — рассеивающая составляющая эффективной оптической глубины  $\tau_{эф}$  формирования диффузно отраженного однородным полубесконечным слоем излучения. Их значения определяются по данным об альbedo однократного рассеяния в молекулярной полосе поглощения  $\omega_v$  и непрерывном спектре  $\omega_c$ :

$$Nl/\tau_s = [(1/\omega_v) - (1/\omega_c)]/k_v = [(\tau_v + \tau_c)/\tau_s - (\tau_c/\tau_s)]/k_v, \quad (2)$$

$$NL = (Nl/\tau_s)\tau_{\text{эф}}\omega_v, \quad (3)$$

где  $\tau_v$  и  $\tau_\kappa$  — составляющие эффективной оптической глубины, обусловленные поглощением в молекулярной полосе и непрерывном спектре соответственно. Спектральные значения  $\omega$  определяются из сравнения наблюдаемых значений отражательной способности с рассчитанными для модели оптически однородного полубесконечного слоя.

Поскольку ранее было показано, что форма упомянутых графических зависимостей не зависит от степени вытянутости принимаемой при модельных расчетах индикатрисы рассеяния, то здесь будут использованы модельные расчеты для двухчленной индикатрисы рассеяния Хенни—Гринштейна

$$\chi(\alpha) = \frac{a(1 - g_1^2)}{(1 + 2g_1\cos\alpha + g_1^2)^{3/2}} + \frac{(1 - a)(1 - g_2^2)}{(1 + 2g_2\cos\alpha + g_2^2)^{3/2}}, \quad (4)$$

где для параметров принимались следующие значения:  $a = 0.766$ ,  $g_1 = 0.6$  и  $g_2 = -0.25$ . Такой индикатрисе рассеяния соответствует фактор асимметрии 0.4, или значение  $x_1 = 1.2$  первого члена при ее разложении в ряд по полиномам Лежандра.

Как и в предыдущих наших работах [2—5], для анализа использовались данные о спектральных зависимостях геометрического альbedo и монохроматического коэффициента поглощения метана, которые приведены в работе [11]. Из сравнения значений  $A_g(\lambda)$  [11] с рассчитанными для указанной выше индикатрисы рассеяния были определены спектральные значения альbedo однократного рассеяния  $\omega$ .

Для Юпитера и Сатурна, в спектрах которых практически невидимы полосы поглощения  $\lambda < 530$  нм, как и в работе [5], спектральные значения  $\tau_\kappa/\tau_s$  для Юпитера и Сатурна оценивались с помощью аппроксимационных выражений

$$\ln(\tau_\kappa/\tau_s)_\lambda = -3.16 - 5.65\ln(\lambda/415)$$

для Юпитера и

$$\ln(\tau_\kappa/\tau_s)_\lambda = -2.15 - 7.82\ln(\lambda/415)$$

для Сатурна, параметры которых оценивались из значений  $\tau_\kappa/\tau_s$  на длинах волн 415 и 517 нм. Для Урана и Нептуна в области спектра с  $\lambda \geq 600$  нм спектральные значения  $\tau_\kappa/\tau_s$  принимались равными нулю.

Следует отметить, что вопрос об изменении  $k_v$  при изменении температуры практически не изучен. Как следует из работы [21], интегральный коэффициент поглощения вращательных линий метана (по крайней мере полосы  $\nu_3$ ) изменяется с температурой по закону

$$S_j(T) \approx T^{-(5/2)} \exp\{-(hcB/kT)[j(j+1) + 0.25]\}. \quad (5)$$

Поэтому следует ожидать значительного увеличения интегрального коэффициента поглощения полосы поглощения  $S_0$  с уменьшением температуры. Легко убедиться, что при  $j \rightarrow \infty$   $S_0(T) \approx T^{-(3/2)}$ . Очевидно, что при малых значениях квантового числа  $j$ , т. е. в центре полосы поглощения, величина  $k_v$  должна увеличиваться с уменьшением температуры примерно как  $T^{-(5/2)}$ , тогда как в далеких крыльях должно иметь место уменьшение  $k_v$  с уменьшением  $T$ . В соответствии с выражением (5) такая ситуация должна иметь место для вращательных линий со значением  $j > 13$ . В то же время немногочисленные лабораторные исследования метана при низких температурах не показывают таких сильных изменений  $k_v$  [20] и  $S_0$  [12, 18, 19] (рис. 2 и табл. 2).

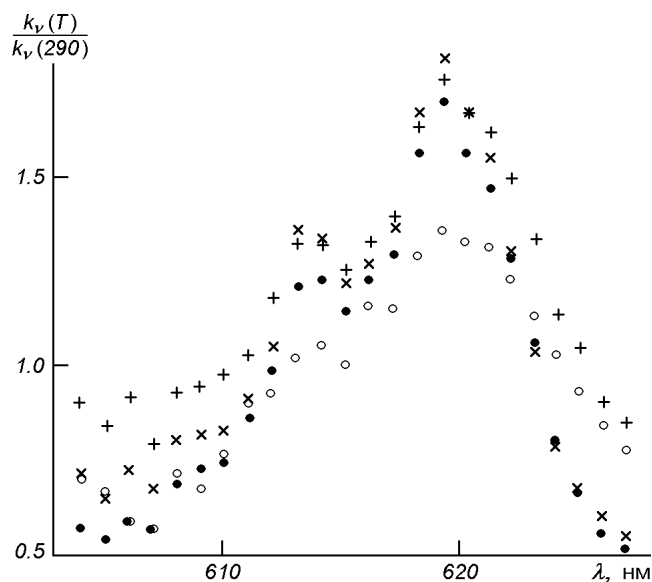


Рис. 2. Относительное изменение  $k_v$  с изменением температуры по данным работы [20]. Кружки —  $T = 200$  К, крестики —  $150$  К, точки —  $125$  К, косые крестики —  $100$  К

Таблица 2. Интегральные коэффициенты поглощения  $S_0$  метана в жидком и газообразном состояниях

$\lambda$ , нм	$S_0$ , $\text{см}^{-1}(\text{км-аматгт})^{-1}$								
	[18]	[8]	[14]	[7]	[20]				
	$T < 100$ К	$T = 290$ К			100 К	125 К	150 К	200 К	290 К
999	$6860 \pm 400$	6330		5680					
887	$6850 \pm 400$	6380		6200					
864	$1200 \pm 300$	871		773					
841	$140 \pm 40$	119		90					
790	$450 \pm 40$	469		406					
727	$844 \pm 40$	825	775	768					
619	$130 \pm 30$	143	123	148	187	176	198	161	144

Более того, Поллак и др. при сравнении контуров  $k_v$  для полос поглощения  $\lambda\lambda$  619, 727, 790 и 887 нм в жидком [19] и газообразном [8] состояниях для последних трех полос не обнаружили изменений  $k_v$  и в центрах полос поглощения, хотя указали на его уменьшение в крыльях для жидкого состояния метана. Не исключено, что температурная зависимость монохроматических коэффициентов поглощения является функцией типа полосы поглощения.

Поскольку данные работы [20], как видно из рис. 2, не позволяют с необходимой точностью оценить спектральные значения  $k_v$  при соответствующих планетам-гигантам температурах, то это делалось методом последовательных приближений. На первом этапе, исходя из предположения, что температурная зависимость монохроматического коэффициента поглощения метана полосы  $\lambda$  619 нм подчиняется закономерности

$$k_v(T) = k_v(T_0)(T/T_0)^n \quad (6)$$

были оценены усредненные по лабораторным данным о монохроматических

коэффициентах поглощения при  $T = 200, 150, 125, 100$  К и  $T_0 = 290$  К спектральные значения параметра  $n$  (табл. 3).

По данным о  $n(\lambda)$  были рассчитаны спектральные значения  $k_v$  для температурного режима Урана и Нептуна, в спектрах которых полоса поглощения  $\lambda = 619$  нм является наиболее сильной и охватывает наиболее широкий спектральный интервал. Поскольку в работе [20] спектральный интервал ограничен длиной волны  $\lambda = 627$  нм, то в качестве базовых значений  $k_v(\lambda)$  при комнатной температуре были взяты данные работы [16]. Полученные таким образом значения  $k_v(\lambda)$  были использованы для вычислений значений  $\ln NL$ . Построенные графические зависимости  $\ln \tau_s$  от  $\ln NL$  показали не только случайный разброс точек, который обусловлен ошибками оценок геометрического альbedo и  $k_v$ , но и систематическое несовпадение длинноволнового и коротковолнового фрагментов контура полосы поглощения. Последнее обусловлено как спектральными зависимостями рассеивающей составляющей оптической толщины и индикатрисы рассеяния газовой-аэрозольной среды, так и несовпадениями центра полосы поглощения в  $k_v(\lambda)$  с одной стороны и в  $A_g(\lambda)$  — с другой. На такое несовпадение непосредственно указывают наблюдательные данные работы [11]. Так, для всех четырех планет значения геометрического альbedo на длина волн  $\lambda = 619$  и  $620$  нм или очень близки между собой, или, как в случае Сатурна, одинаковы, тогда как величины  $k_v(\lambda)$  на  $\lambda = 619$  нм всегда больше. Безусловно, что без учета этих факторов не могут быть получены достовер-

Таблица 3. Спектральные значения параметра  $n$  и рассчитанные значения  $k_v$

$\lambda$ , нм	$n$	$n'$	$\ln k_v$		
			Юпитер	Сатурн	Уран и Нептун
604	-0.50±0.17	-1.20±0.01	-4.37	-4.68	-5.27
605	-0.64±0.19	-1.10±0.00	-4.29	-4.57	-5.11
606	-0.64±0.28	-0.88±0.01	-4.05	-4.28	-4.72
607	-0.75±0.28	-0.63±0.00	-3.69	-3.86	-4.17
608	-0.42±0.18	-0.42±0.00	-3.34	-3.45	-3.65
609	-0.42±0.20	-0.25±0.03	-3.09	-3.16	-3.28
610	-0.24±0.09	-0.34±0.03	-2.98	-3.07	-3.23
611	-0.12±0.07	-0.33±0.06	-2.71	-2.80	-2.96
612	+0.02±0.09	-0.20±0.05	-2.32	-2.37	-2.47
613	+0.25±0.07	-0.02±0.03	-1.77	-1.78	-1.79
614	+0.27±0.06	+0.20±0.01	-1.19	-1.14	-1.04
615	+0.17±0.07	+0.28±0.04	-0.90	-0.83	-0.69
616	+0.32±0.06	+0.22±0.03	-0.72	-0.66	-0.55
617	+0.37±0.06	+0.32±0.01	-0.63	-0.54	-0.38
618	+0.61±0.06	+0.52±0.01	-0.09	+0.05	+0.30
619	+0.72±0.07		+0.12	+0.31	+0.66
620	+0.64±0.08	+0.68±0.01	+0.06	+0.24	+0.58
621	+0.59±0.09	+0.56±0.01	-0.15	0.00	+0.27
622	+0.43±0.09	+0.44±0.03	-0.45	-0.34	-0.12
623	+0.23±0.10	+0.23±0.02	-0.86	-0.80	-0.68
624	-0.05±0.11	-0.02±0.05	-1.36	-1.37	-1.38
625	-0.24±0.12	-0.37±0.01	-1.91	-1.98	-2.10
626	-0.43±0.11	-0.51±0.00	-2.42	-2.52	-2.71
627	-0.56±0.12	-0.56±0.04	-2.91	-3.04	-3.28
628		-0.63±0.01	-3.45	-3.63	-3.93
629		-0.61±0.05	-3.89	-4.05	-4.35
630		-0.73±0.04	-4.37	-4.56	-4.92
631		-0.70±0.05	-4.69	-4.88	-5.22
632		-0.60±0.04	-4.95	-5.10	-5.40
633		-0.50±0.06	-5.08	-5.21	-5.46

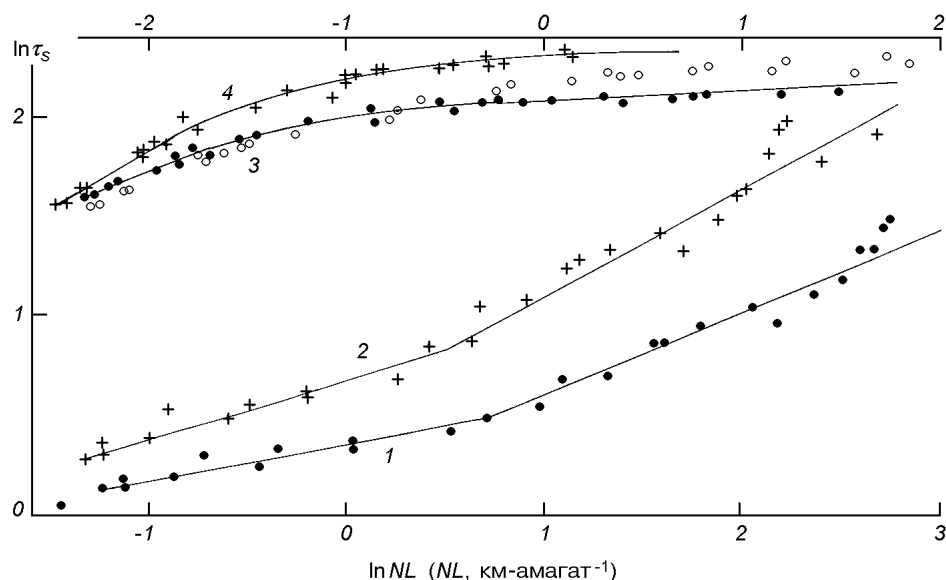


Рис. 3. Графические зависимости  $\ln \tau_s$  от  $\ln NL$  для Нептуна (1), Урана (2), Юпитера (3) и Сатурна (4). Кружки — Сатурн в предположении отсутствия поглощения в непрерывном спектре

ные графические зависимости  $\ln \tau_s$  от  $\ln NL$ . Поскольку разделить эти факторы невозможно, то их приближенный учет делался на основе предположения, что суммарное их действие может быть аппроксимировано выражением

$$\ln(\tau_s)_\lambda = \ln(\tau_s)_{619} + m \ln(\lambda/619). \quad (7)$$

Оценки параметра  $m$  делались методом подбора таким образом, чтобы минимизировать разброс «красных» и «синих» фрагментов контура полосы поглощения. Оказалось, что для обеих планет значение этого параметра должно находиться в пределах от  $-3.65$  до  $-4$  (рис. 3). По графическим зависимостям 1, 2 были получены спектральные значения  $k_v(\lambda)$ , которые оказались очень близкими. Их усредненные значения приведены в табл. 3 (последняя графа).

На втором этапе по этим усредненным оценкам  $k_v$  были заново переоценены значения параметра  $n(\lambda)$  и рассчитаны спектральные значения мономатического коэффициента поглощения для температурных режимов Юпитера и Сатурна, после чего по описанной выше методике уточнены  $k_v(\lambda)$ . Оказалось, что для Юпитера и Сатурна значения параметра  $m$  выражения (7) оказались примерно равными  $-0.8$  и  $+1.6$ . По полученным спектральным значениям  $k_v(\lambda)$  для Юпитера и Сатурна были снова оценены спектральные значения параметра  $n(\lambda)$ .

Оказалось, что полученные оценки  $n(\lambda)$  для разных планет несколько различаются, особенно сильно в концах крыльев полос поглощения. Помимо перечисленных выше погрешностей и неточности исправления спектральных значений оптической толщины по выражению (7), большое влияние оказывают погрешности определения спектральных значений геометрического альbedo. Так, в работе [11] утверждается, что погрешность относительных измерений составляет 2 %, поэтому при значениях геометрического альbedo 0.600 погрешность оценок оптической толщины достигает  $\pm 0.12$ , тогда как в случае Юпитера в интервале длин волн  $\lambda\lambda = 605...611$  и

627...631 нм наблюдается изменение  $\tau_s$  всего на 0.06. В зависимости от того, на какую часть графической зависимости  $\ln NL/\tau_s$  от  $\ln NL$  приходится значение  $\ln \tau_s$ , погрешность определения мономатического коэффициента поглощения может изменяться. Так, в соответствии с графической зависимостью для Сатурна при  $\ln \tau_s = 1.16 \pm 0.06$  погрешность определения  $\ln k_v$  достигает 0.50.

Чтобы минимизировать случайные ошибки, были усреднены значения  $n(\lambda)$  для всех четырех планет в спектральном интервале  $\lambda\lambda = 610...627$  и только для Урана и Нептуна — в диапазонах длин волн  $\lambda\lambda = 604...609$  и  $628...633$  нм. Уже по этим средним значениям  $n'(\lambda)$  были рассчитаны спектральные значения  $\ln k_v$  на тепловые режимы Юпитера, Сатурна и Урана с Нептуном. Полученные значения  $n'(\lambda)$  и  $\ln k_v(\lambda)$  приведены в табл. 3. О степени различия  $\ln k_v(\lambda)$  для этих планет с приведенными в работе [11] данными можно судить по рис. 4.

Как говорилось выше, полученные из наблюдений оценки  $\ln NL/\tau_s$  исправлялись за поглощение в непрерывном спектре, оценки которого ни в коем случае не могут претендовать на высокую точность. Для проверки того, насколько сильно погрешность оценки величины поглощения в непрерывном спектре сказывается на оценках мономатических коэффициентов поглощения, на рис. 3 светлыми кружками приведено графическую зависимость  $\ln NL/\tau_s$  от  $\ln NL$  для Сатурна, для которой значение  $\ln NL$  вычислялось с использованием приведенных в табл. 3 значений  $\ln k_v$ . Как видно, эта зависимость подтверждает сделанный ранее вывод, что характер зависимости  $\ln NL/\tau_s$  от  $\ln NL$  практически не зависит от того, учитывается или не учитывается поглощение в непрерывном спектре (см., например, [2]). Это очень важное обстоятельство дает возможность вести подобные уточнения мономатических коэффициентов поглощения без учета поглощения в непрерывном спектре, что не только уменьшает объем работы, но и связанные с этим погрешности.

Безусловно, полученные здесь значения мономатических коэффициентов поглощения метана не могут претендовать на высокую точность хотя бы потому, что для этого использовались наблюдательные данные с довольно большой абсолютной и относительной погрешностью. Однако, учитывая

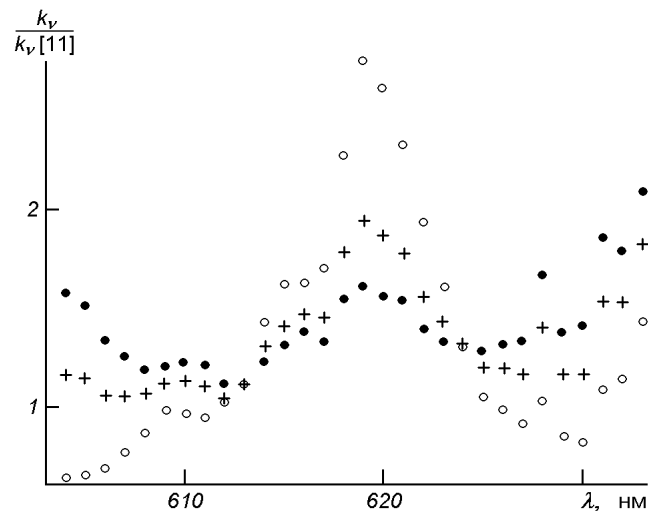


Рис. 4. Отношение значений  $k_v$  для Урана и Нептуна (кружки), Сатурна (крестики) и Юпитера (точки) к соответствующим значениям  $k_v$  из работы [11]



полное отсутствие данных о  $k_p$  для тепловых режимов планет-гигантов, в последующем мы попытаемся получить их значения и для других полос поглощения метана. Для того чтобы получить более точные значения монокроматического коэффициента поглощения метана, необходимо проведение специальных спектрофотометрических измерений, которые хотя бы на порядок понизили относительную погрешность, а также повысили бы точность фиксации длин волн в спектре планет.

1. *Мороженко А. В.* О структуре облачного слоя Юпитера // Письма в Астрон. журн.—1984.—19, N 1.—С. 64—76.
2. *Мороженко А. В.* Проблемы вертикальной структуры облачных слоев планет-гигантов // Кинематика и физика небес. тел.—1993.—9, № 6.—С. 3—26.
3. *Мороженко А. В.* Вероятные пределы для размеров частиц и относительных концентраций аэрозоля на уровнях формирования центров полос поглощения метана на  $\lambda\lambda$  727, 619, 543 и 441 нм // Кинематика и физика небес. тел.—1999.—15, № 2.—С. 3—20.
4. *Мороженко А. В.* Модель вертикальной структуры оптических параметров атмосферы Нептуна // Кинематика и физика небес. тел.—1999.—15, № 3.—С. 254—264.
5. *Мороженко А. В.* Различие вертикальных структур облачных слоев планет-гигантов // Кинематика и физика небес. тел.—2001.—17, № 3.—С. 261—278.
6. *Benner D. C.* The visual and near infrared spectrum of methane and its applications to Uranus, Neptune, Triton and Pluto: Ph. D. dissertation. — Univ. of Arizona, Tucson, 1979.
7. *Fink U., Benner D. Ch., Dick K. A.* Band model analysis of laboratory methane absorption spectra from 4500 to 10500  $\text{\AA}$  // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer.—1977.—18, N 3.—P. 447—457.
8. *Giver L. P.* Intensity measurements of the  $\text{CH}_4$  bands in the region 4350 to 10600  $\text{\AA}$  // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer.—1978.—19, N 2.—P. 311—322.
9. *Hanel R., Corath B., Flasar F. M. et al.* Albedo, internal heat, and energy balance of Jupiter: preliminary results for the Voyager infrared investigation // J. Geophys. Res.—1981.—A86, N 10.—P. 8705—8712.
10. *Hildebrand R. H., Loewenstein R. F., Harper D. A. et al.* Farinfrared and submillimeter brightness temperatures of the giant planets // Icarus.—1985.—64, N 1.—P. 64—87.
11. *Karkoshka E.* Spectrophotometry of the Jovian Planets and Titan at 300- to 1000-nm wavelength: The methane spectrum // Icarus.—1994.—111, N 1.—P. 174—192.
12. *Karkoshka E., Tomasko M. G.* Saturn's upper troposphere 1986—1989 // Icarus.—1992.—97, N 2.—P. 161—181.
13. *Lutz B. L., Owen T., Cess R. D.* Laboratory band strengths of methane and their application to the atmospheres of Jupiter, Saturn, Uranus, Neptune, and Titane // Astrophys. J.—1976.—203, N 2.—P. 541—551.
14. *Lutz B. L., Owen T., Cess R. D.* Laboratory band strengths of methane and their application to the atmospheres of Jupiter, Saturn, Uranus, Neptune, and Titane II. The red region 6000—7600  $\text{\AA}$  // Astrophys. J.—1982.—258, N 3, Pt. 1.—P. 886—898.
15. *Melnick G., Russel R. W., Gosnell T., Harwit M.* Spectrophotometry of Saturn and its rings from 60 to 180 microns // Icarus.—1983.—53, N 2.—P. 310—318.
16. *Mickelson M. E., Larson L. E., Schubert A.* New measurements of the 6190  $\text{\AA}$  band of methane // J. Geophys. Res.—1991.—96, N E2.—P. 17507—17512.
17. *Pearl J. C., Conrath B. J., Hanel R. A., et al.* The albedo, effective temperature, and energy balance of Uranus, as determined from Voyager IRIS data // Icarus.—1990.—84, N 1.—P. 12—28.
18. *Pollack J. B., Rages K., Baines K. H., et al.* Estimates of the bolometric albedos and radiation balance of Uranus and Neptune // Icarus.—1986.—65, N 2/3.—P. 442—466.
19. *Ramaprasad R. R., Caldwell J., McClure D. S.* The vibrational overtone spectrum of liquid methane in the visible and near infrared; Application to planetary studies // Icarus.—1978.—35, N 3.—P. 400—409.
20. *Smith W. H., Conner Ch. P., Baines K. H.* Absorption coefficient for the 6190  $\text{\AA}$  band between 290 and 100 K with application to Uranus' atmosphere // Icarus.—1990.—85, N 1.—P. 58—64.
21. *Varanasi P., Sarangi S., Pugh L.* Measurements of the infrared lines of planetary gases low temperatures. I.  $\nu_3$  — fundamental of methane // Astrophys. J.—1973.—179, N 3.—P. 977—982.

Поступила в редакцию 28.03.02