

УДК 523.481-852

А. В. Мороженко

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
03680 Киев, ул. Академика Заболотного 27

Аммиак в атмосферах Юпитера и Сатурна: коэффициенты поглощения

Определены спектральные (со спектральным разрешением 1 нм) значения произведения k и k (k — монохроматический коэффициент поглощения аммиака, i — относительные (по отношению к водородно-гелиевой смеси 0.85/0.15 и метану соответственно) концентрации аммиака для полос поглощения на $\lambda = 552, 604, 645, 787$ и 932 нм в тепловых режимах атмосфер Юпитера и Сатурна (<http://www.mao.kiev.ua/planets/page5-e.html>).

АМІАК В АТМОСФЕРАХ ЮПІТЕРА І САТУРНА: КОЕФІЦІЄНТИ ПОГЛИНАННЯ, Мороженко О. В. — Визначено спектральні (зі спектральним розділенням 1 нм) значення добутку k і k (k — монохроматичні коефіцієнти поглинання аміаку, i — відносні (по відношенню до воднево-гелієвої суміші 0.85/0.15 та метану відповідно) концентрації аміаку для смуг поглинання на довжинах хвиль $\lambda = 552, 604, 645, 787$ і 932 нм в теплових режимах атмосфер Юпітера і Сатурна (<http://www.mao.kiev.ua/planets/page5-e.html>).

AMMONIA IN THE ATMOSPHERES OF JUPITER AND SATURN: ABSORPTION COEFFICIENTS, by Morozhenko A. V. — We determined the spectral (with a spectral resolution of 1 nm) values for the productions k and k (k is monochromatic absorption coefficient of ammonia, and i are the relative (to the hydrogen-helium mixture (0.85/0.15) and methane, respectively) concentrations of ammonia for the ammonia bands at wavelengths of $\lambda = 552, 604, 645, 787$ nm in thermal conditions in the atmospheres of Jupiter and Saturn (<http://www.mao.kiev.ua/planets/page5-e.html>).

Считается, что в спектре Юпитера проявляются три полосы поглощения аммиака ($\lambda = 552, 645$ и 792 нм), а в спектре Сатурна — только на $\lambda = 645$ нм. В предыдущей нашей работе [4] на полученных

зависимостях спектральных коэффициентов поглощения метана k от длины волны была обнаружена депрессия на длине волны $\lambda = 604$ нм, формой напоминающая полосы поглощения аммиака, и которая отсутствовала в спектральных зависимостях k для Урана и Нептуна [3]. Отметим, что Е. Антонов и др. [1] обнаружили эту полосу методом внутривибрационной лазерной спектроскопии, а также полосу на $\lambda = 625$ нм в лабораторных условиях. Поэтому после уточнения вертикальных структур аэрозольной составляющей оптической толщины (для всех планет-гигантов) и относительной концентрации метана в атмосферах Урана и Нептуна [5] были также переопределены значения k в интервале $\lambda = 433.2...1000$ нм, значения которых приведены только на сайте <http://www.mao.kiev.ua/planets/page5-e.html>. Процедура этого определения детально описана в наших работах [3, 4]. Здесь только напомним, что для соответствующих моделей вертикальной структуры аэрозольной составляющей атмосферы и относительной концентрации метана первоначально рассчитывались зависимости рассеивающих составляющих оптической толщины $\ln \tau_s$ от количества метана на луче зрения $\ln NL$. Затем, сравнивая полученные по наблюдательным данным значения $\ln \tau_s$ с рассчитанными, мы находили значения $\ln NL$, а по ним определяли $\ln k$. В этих расчетах использовались полученные в работе [5] модели вертикальной структуры аэрозольной составляющей и относительной концентрации метана, а именно:

$$\ln \tau_a(p) = -0.720 + 1.507 \ln p \quad (-2.2085 \ln p - 1.0018),$$

$$\ln \tau_a(p) = +1.225 + 1.160 \ln p \quad (-1.0018 \ln p - 0.0595),$$

$$\ln \tau_a(p) = +2.318 + 0.192 \ln p \quad (-0.0595 \ln p),$$

= 0.0027 для Юпитера;

$$\ln \tau_a(p) = -0.846 + 1.598 \ln p \quad (-3.3619 \ln p - 2.0575),$$

$$\ln \tau_a(p) = +1.238 + 1.342 \ln p \quad (-2.0575 \ln p - 1.2074),$$

$$\ln \tau_a(p) = +2.379 + 0.722 \ln p \quad (-1.2074 \ln p - 0.6501),$$

$$\ln \tau_a(p) = +2.781 + 0.326 \ln p \quad (0.6501 \ln p),$$

= 0.0027 для Сатурна;

$$\ln \tau_a(p) = -2.694 + 0.087 \ln p \quad (+0.3685 \ln p + 1.2314),$$

$$\ln \tau_a(p) = -2.619 + 7.341 \ln p \quad (+1.2314 \ln p + 1.7556),$$

$$\ln \tau_a(p) = +1.229 + 0.956 \ln p \quad (+1.7556 \ln p)$$

для Урана;

$$\ln \tau_a(p) = -1.861 + 1.248 \ln p \quad (+0.3204 \ln p + 0.9051),$$

$$\ln \tau_a(p) = -1.131 + 0.347 \ln p \quad (+0.9051 \ln p)$$

для Нептуна; а также усредненной по глубине относительной концентрации метана

$$\ln \tau(p) = -9.982 + 2.676 \ln p \quad (0.3584 \ln p + 1.5445),$$

$$= 0.00382 \quad (\ln p + 1.6156),$$

$$\ln \tau(p) = -9.738 + 2.561 \ln p \quad (0.3237 \ln p + 1.6156),$$

$$= 0.00554 \quad (\ln p + 1.6156)$$

соответственно для Урана и Нептуна (p , бар). Здесь τ_a — аэрозольная составляющая оптической толщины.

Зависимости $\ln \tau_s$ от $\ln NL$ рассчитывались для центров полос поглощения метана на длинах волн $\lambda = 441, 460, 486, 510, 522, 756, 596, 619, 666, 702, 727, 797, 841, 864, 887$ и 988 нм, а также для длины волны 939 нм. При сравнении расчетов с наблюдениями учитывалось изменение рассеивающей составляющей оптической толщины от длины волны. Полученные в этой работе спектральные значения коэффициента поглощения метана для планет-гигантов подтвердили результаты работы [4], в которой было обнаружено наличие в спектрах Юпитера и Сатурна ряда полос поглощения, которые своей формой напоминают полосы поглощения аммиака. На рис. 1 приведено сравнение спектральных значений k для Юпитера (точки), Сатурна (крестики) и Урана (косые крестики) в тех интервалах длин волн, в которых наблюдались эти депрессии. Еще просматривается очень слабая депрессия на длине волны $\lambda = 628$ нм, но ее мы не будем принимать во внимание. Отметим, что о довольно сильной аммиачной депрессии на $\lambda = 932$ нм не упоминается даже в монографии Г. Герцберга [2].

При определении значений k используются зависимости рассеивательной составляющей оптической толщины от количества метана NL на луче зрения. Легко убедиться, что если на какой-то длине волны поглощающими газами являются метан и аммиак, то величина поглощательной составляющей равна

$$\tau = k NL = [k(\text{CH}_4) + k(\text{NH}_3)]NL,$$

где τ — относительная (по отношению к метану) объемная концентрация аммиака. Поэтому оцениваемое значение k является собой суперпозицию коэффициентов поглощения двух газов:

$$k = k(\text{CH}_4) + k(\text{NH}_3).$$

Следовательно, если известна форма спектральной зависимости поглощения метана в интервале длин волн, на который накладывается

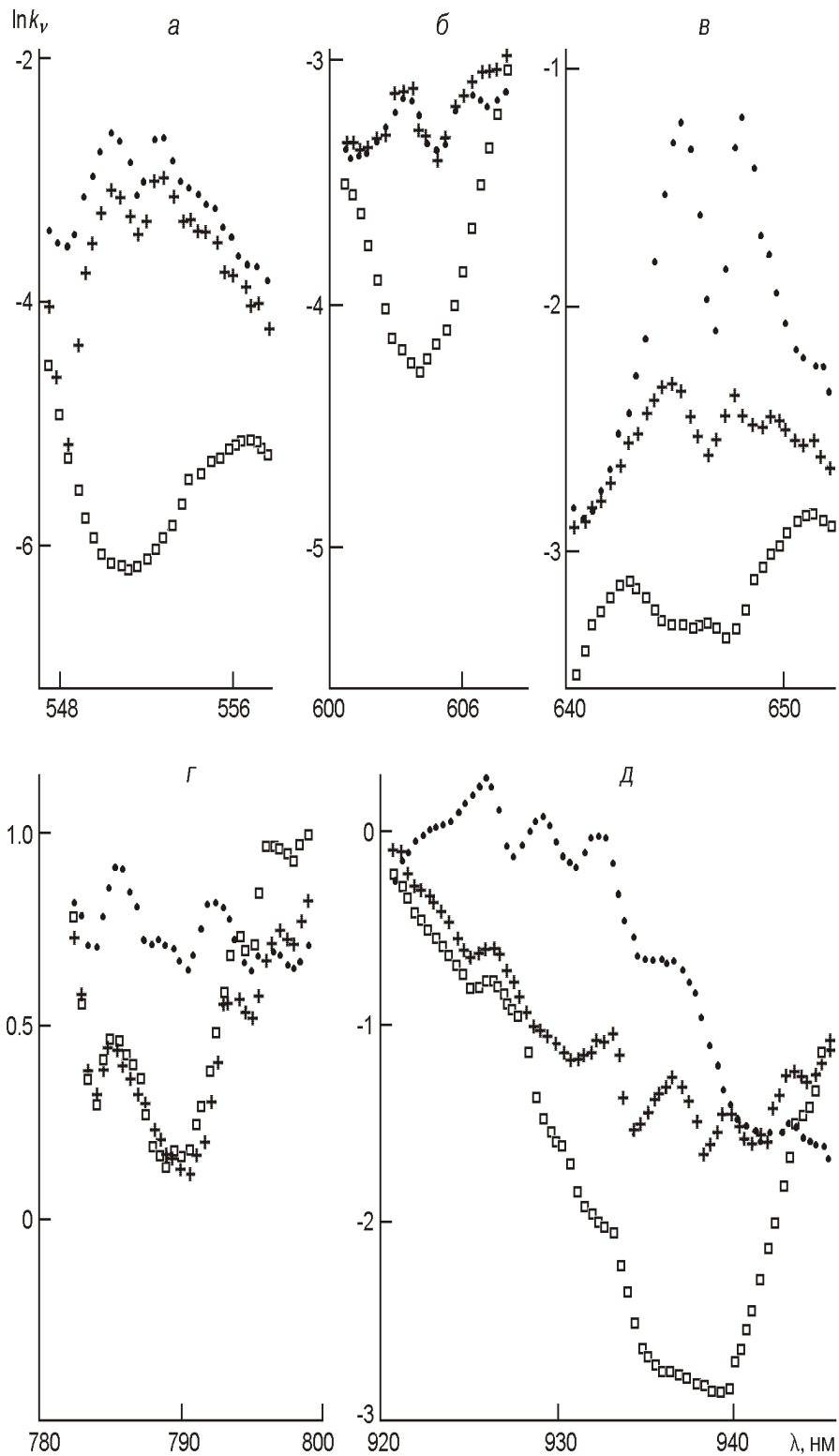


Рис. 1. Фрагменты спектральной зависимости монохроматического коэффициента поглощения для Юпитера (точки), Сатурна (крестики) и Урана (квадратики) с центрами на длинах волн 552 (а), 605 (б), 645 (в), 789 (г) и 932 нм (д)

полоса поглощения иного газа (в нашем случае аммиака), то нетрудно определить спектральные значения произведения k (NH_3). Поскольку в действительности эта форма неизвестна, то для определения хотя бы приближенной формы k (CH_4) предполагалось, что для всех участков спектра, в которых есть основание подозревать наличие аммиачного поглощения, форма спектральной зависимости k (CH_4) идентично этой зависимости для Урана. В этом предположении и определялись значения k (CH_4), которые приведены в табл. 1.

Таблица 1. Значения коэффициентов поглощения метана k (CH_4), а также произведений k и k (k в $\text{см}^{-1}\text{км-атм}^{-1}$)

λ , нм	k (CH_4)	k	k	k (CH_4)	k	k
942.4	0.2172	0.000	0.00000	0.1938	0.000	0.000000
942.0	0.2049	0.011	0.00003	0.1392	0.018	0.000049
941.6	0.1764	0.037	0.00010	0.1198	0.040	0.000187
941.2	0.1541	0.060	0.00016	0.1047	0.051	0.000137
940.8	0.1357	0.083	0.00022	0.0922	0.072	0.000196
940.4	0.1226	0.107	0.00029	0.0832	0.097	0.000262
940.0	0.1127	0.132	0.00036	0.0765	0.116	0.000315
939.6	0.1036	0.165	0.00044	0.0704	0.123	0.000333
939.2	0.0978	0.201	0.00054	0.0665	0.108	0.000293
938.8	0.0978	0.235	0.00063	0.0664	0.097	0.000261
938.4	0.1032	0.280	0.00076	0.0701	0.083	0.000223
938.0	0.1046	0.327	0.00088	0.0708	0.120	0.000324
937.6	0.1044	0.354	0.00096	0.0709	0.145	0.000392
937.2	0.1064	0.382	0.00103	0.0722	0.171	0.000461
936.8	0.1080	0.405	0.00109	0.0733	0.182	0.000493
936.4	0.1110	0.404	0.00109	0.0754	0.169	0.000455
936.0	0.1138	0.398	0.00108	0.0773	0.160	0.000432
935.6	0.1143	0.399	0.00108	0.0776	0.152	0.000410
935.2	0.1185	0.395	0.00107	0.0805	0.134	0.000363
934.8	0.1259	0.400	0.00108	0.0855	0.114	0.000307
934.4	0.1417	0.420	0.00114	0.0962	0.099	0.000266
934.0	0.1645	0.467	0.00126	0.1116	0.128	0.000333
933.6	0.1901	0.529	0.00143	0.1291	0.173	0.000467
933.2	0.1959	0.652	0.00176	0.1331	0.281	0.000542
932.8	0.2334	0.739	0.00200	0.1585	0.169	0.000456
932.4	0.2372	0.796	0.00215	0.1611	0.169	0.000456
932.0	0.2461	0.721	0.00195	0.1671	0.143	0.000386
931.6	0.2556	0.629	0.00170	0.1736	0.135	0.000364
931.2	0.2797	0.553	0.00149	0.1899	0.110	0.000298
930.8	0.3205	0.522	0.00141	0.2176	0.087	0.000235
930.4	0.3563	0.532	0.00144	0.2420	0.075	0.000201
930.0	0.3757	0.579	0.00156	0.2551	0.078	0.000212
929.6	0.3848	0.643	0.00174	0.2613	0.084	0.000221
929.2	0.4066	0.676	0.00182	0.2761	0.077	0.000209
928.8	0.4529	0.611	0.00165	0.3673	0.058	0.000159
928.4	0.5616	0.435	0.00118	0.3814	0.014	0.000039
928.0	0.6839	0.242	0.00065	0.4644	0.000	0.000000

Продолжение табл. 1

, нм	k (CH ₄)	k	k	k (CH ₄)	k	k
927.6	0.7075	0.170	0.00046	—	—	—
927.2	0.7334	0.197	0.00053	—	—	—
926.8	0.7914	0.312	0.00084	—	—	—
926.4	0.8187	0.449	0.00121	—	—	—
926.0	0.8261	0.504	0.00136	—	—	—
925.6	0.8073	0.468	0.00126	—	—	—
925.2	0.7945	0.404	0.00109	—	—	—
924.8	0.8378	0.310	0.00084	—	—	—
924.4	0.8932	0.208	0.00056	—	—	—
924.0	0.9361	0.116	0.00031	—	—	—
923.6	0.9881	0.040	0.00011	—	—	—
923.2	1.0161	0.000	0.00000	—	—	—
793.2	2.1576	0.000	0.00000	—	—	—
792.8	2.0855	0.083	0.00022	—	—	—
792.4	1.8851	0.352	0.00095	—	—	—
792.0	1.6871	0.568	0.00153	—	—	—
791.6	1.5311	0.737	0.00199	—	—	—
791.2	1.3910	0.730	0.00197	—	—	—
790.8	1.3351	0.645	0.00174	—	—	—
790.4	1.2636	0.629	0.00170	—	—	—
790.0	1.2275	0.717	0.00194	—	—	—
789.6	1.2381	0.777	0.00210	—	—	—
789.2	1.1936	0.844	0.00228	—	—	—
788.8	1.2312	0.821	0.00222	—	—	—
788.4	1.2548	0.791	0.00214	—	—	—
788.0	1.2815	0.773	0.00209	—	—	—
787.6	1.4348	0.806	0.00218	—	—	—
787.2	1.5543	0.776	0.00210	—	—	—
786.8	1.5904	0.844	0.00241	—	—	—
786.4	1.6471	0.832	0.00225	—	—	—
786.0	1.6504	0.708	0.00191	—	—	—
785.6	1.5496	0.630	0.00170	—	—	—
785.2	1.4064	0.619	0.00167	—	—	—
784.8	1.5342	0.502	0.00136	—	—	—
784.4	1.8460	0.355	0.00096	—	—	—
784.0	2.2705	0.000	0.000000	—	—	—
650.8	0.12543	0.000	0.000000	—	—	—
650.4	0.11036	0.006	0.000015	—	—	—
650.0	0.10362	0.025	0.000068	0.08543	0.0000	0.000000
649.6	0.09798	0.047	0.000127	0.08078	0.0057	0.000015
649.2	0.09575	0.074	0.000200	0.07895	0.0084	0.000023
648.8	0.09126	0.080	0.000217	0.07525	0.0083	0.000022
648.4	0.08604	0.098	0.000266	0.07093	0.0134	0.000036
648.0	0.07555	0.169	0.000455	0.06229	0.0258	0.000070
647.6	0.07058	0.229	0.000619	0.05819	0.0361	0.000098
647.2	0.06918	0.196	0.000530	0.05704	0.0307	0.000083
646.8	0.07051	0.090	0.000243	0.05813	0.0216	0.000058
646.4	0.07222	0.052	0.000140	0.05955	0.0156	0.000042
646.0	0.07208	0.069	0.000187	0.05943	0.0208	0.000056
645.6	0.07086	0.130	0.000350	0.05843	0.0308	0.000083
645.2	0.07108	0.195	0.000526	0.05860	0.0397	0.000107

Окончание табл. 1

λ , нм	k (CH ₄)	k	k	k (CH ₄)	k	k
644.8	0.07201	0.225	0.000607	0.05937	0.0433	0.000117
644.4	0.07361	0.193	0.000520	0.06069	0.0376	0.000102
644.0	0.07435	0.143	0.000386	0.06130	0.0326	0.000088
643.6	0.08022	0.085	0.000228	0.06614	0.0229	0.000062
643.2	0.08308	0.037	0.000101	0.06849	0.0124	0.000034
642.8	0.08612	0.017	0.000045	0.07101	0.0060	0.000016
642.4	0.08453	0.004	0.000010	0.07023	0.0000	0.000000
642.0	0.08022	0.0000	0.0000000	—	—	—
607.2	0.04080	0.0000	0.0000000	0.04209	0.0000	0.0000000
606.8	0.03487	0.0084	0.0000227	0.03597	0.0061	0.0000165
606.4	0.02898	0.0151	0.0000408	0.02990	0.0106	0.0000286
606.0	0.02423	0.0190	0.0000512	0.02500	0.0125	0.0000337
605.6	0.02143	0.0203	0.0000548	0.02204	0.0123	0.0000330
605.2	0.01937	0.0172	0.0000466	0.01998	0.0122	0.0000330
604.8	0.01797	0.0170	0.0000458	0.01854	0.0103	0.0000278
604.4	0.01704	0.0203	0.0000549	0.01758	0.0147	0.0000398
604.0	0.01618	0.0243	0.0000655	0.01669	0.0181	0.0000491
603.6	0.01659	0.0264	0.0000713	0.01711	0.0256	0.0000692
603.2	0.01725	0.0257	0.0000695	0.01779	0.0243	0.0000668
602.8	0.01856	0.0244	0.0000659	0.01914	0.0161	0.0000435
602.4	0.02065	0.0206	0.0000556	0.02419	0.0103	0.0000280
602.0	0.02345	0.0136	0.0000270	0.02779	0.0054	0.0000145
601.6	0.02694	0.0075	0.0000203	0.03152	0.0035	0.0000093
601.2	0.03056	0.0034	0.0000092	0.03378	0.0018	0.0000047
600.8	0.03275	0.0009	0.0000025	0.03597	0.0000	0.0000000
600.4	0.03487	0.0000	0.0000000	—	—	—
556.8	0.02335	0.0000	0.0000000	—	—	—
556.4	0.02352	0.0036	0.000010	—	—	—
556.0	0.02375	0.0080	0.000022	0.00773	0.0000	0.0000000
555.6	0.02321	0.0115	0.000031	0.00755	0.0072	0.000016
555.2	0.02182	0.0180	0.000048	0.00710	0.0116	0.000028
554.8	0.02067	0.0208	0.000056	0.00672	0.0130	0.000032
554.4	0.01861	0.0262	0.000071	0.00605	0.0173	0.000044
554.0	0.01817	0.0294	0.000080	0.00591	0.0191	0.000049
553.6	0.01461	0.0354	0.000096	0.00475	0.0203	0.000051
553.2	0.01231	0.0469	0.000127	0.00401	0.0294	0.000076
552.8	0.01109	0.0606	0.000164	0.00358	0.0390	0.000102
552.4	0.01030	0.0596	0.000161	0.00335	0.0385	0.000101
552.0	0.00916	0.0422	0.000115	0.00298	0.0259	0.000068
551.6	0.00849	0.0355	0.000096	0.00276	0.0233	0.000061
551.2	0.00854	0.0486	0.000131	0.00278	0.0306	0.000081
550.8	0.00903	0.0580	0.000157	0.00294	0.0364	0.000097
550.4	0.00911	0.0634	0.000171	0.00296	0.0392	0.000102
550.0	0.00949	0.0532	0.000144	0.00309	0.0317	0.000088
549.6	0.01081	0.0412	0.000111	0.00352	0.0240	0.000063
549.2	0.01325	0.0287	0.000076	0.00431	0.0169	0.000045
548.8	0.01646	0.0168	0.000045	0.00535	0.0072	0.000019
548.4	0.02149	0.0075	0.000020	0.00699	0.0000	0.000000
548.0	0.03032	0.0000	0.000000	—	—	—

Таблица 2. Значения температуры T и произведения S_0 в спектрах Юпитера и Сатурна (S_0 , $\text{см}^{-1}\text{км-атм}^{-1}$ — суммарный для полосы коэффициент поглощения)

λ , нм	Юпитер		Сатурн	
	T , К	S_0	T , К	S_0
552	223	0.00194	109	0.00112
603	261	0.00064	153	0.00050
645	212	0.00584	154	0.00111
792	147	0.03940	100	0.00000
932	167	0.04780	108	0.01030

Приписав наблюдаемое на рис. 1 различие k поглощению аммиака, мы определили значения k (NH_3) (табл. 1). Здесь же приведены и величины k (NH_3), где λ — относительная концентрация аммиака относительно водородно-гелиевой (0.85/0.15) смеси (при относительной концентрации метана 0.0027 [5]).

Как видно из рис. 1, для Сатурна полоса поглощения аммиака на $\lambda = 792$ нм практически не проявляется, а на $\lambda = 932$ нм заметна только длинноволновая часть полосы NH_3 . Это, вероятнее всего, обусловлено следующим. Поскольку температуры таяния и кипения аммиака соответственно равны 195 и 218 К, а центры всех полос поглощения аммиака формируются на уровнях атмосферы со значительно меньшими температурами (табл. 2), то заметно должен влиять фактор изменения относительной концентрации аммиака с глубиной в атмосфере. Кроме того, как видно из табл. 1, эти полосы проявляются на фоне крыльев довольно мощных полос поглощения метана. О значимости последнего можно судить из того, что очень слабая полоса поглощения аммиака на $\lambda = 552$ нм, центр которой формируется также на уровне с низкой температурой (109 К), расположенная в интервале длин волн с очень малым метановым поглощением, отчетливо видна.

К сожалению, здесь мы даже примерно не можем оценить вероятную погрешность приведенных в табл. 1 оценок, потому что к детально рассмотренным в работах [3—5] погрешностям определения вертикальной структуры аэрозольной составляющей атмосфер, а следовательно, и k , накладывается еще неопределенность нахождения формы k (CH_4). Можно только отметить, что согласно приведенным в табл. 2 данным отношение значений S_0 для полос $\lambda = 645$ и 552 нм составляет примерно 3 (Юпитер), тогда как согласно лабораторным измерениям при комнатной температуре — примерно 6 [6].

1. Антонов Е. Н., Берик Е. Б., Калашиников В. Г. Регистрация спектров поглощения аммиака и метана в области 600—650 нм методом внутривибрационной лазерной спектроскопии. — Троицк, 1978.—22 с.—(Препринт / АН СССР; Ин-т спектроскопии.—№ 2).

2. Герцберг Г. Колебательные и вращательные спектры многоатомных молекул. — М.: Изд-во иностр. лит., 1949.—772 с.
3. Мороженко А. В. Переопределение монохроматических коэффициентов поглощения метана с учетом тепловых режимов планет-гигантов. III. Уран и Нептун // Кинематика и физика небес. тел.—2006.—**22**, № 2.—С. 138—153.
4. Мороженко А. В. Переопределение монохроматических коэффициентов поглощения метана с учетом тепловых режимов планет-гигантов. IV. Юпитер и Сатурн // Кинематика и физика небес. тел.—2007.—**23**, № 6.—С. 337—348.
5. Мороженко А. В., Овсак А. С. Зависимости оптической толщины и относительной концентрации метана от глубины в атмосферах планет-гигантов // Кинематика и физика небес. тел.—2009.—**25**, № 4.—С. 243—258.
6. Lutz B. L., Owen T. The visible band of ammonia: band strengths, curves of growth, and the spatial distribution of ammonia on Jupiter // *Astrophys. J.*—1980.—**235**, N 1, Pt 1.—P. 285—293.

Поступила в редакцию 03.10.08