

ПОЛОСА КИСЛОРОДА (0, 1) $b^1\Sigma_g^+ - X^3\Sigma_g^-$ В СПЕКТРЕ ПОГЛОЩЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

В. Д. Галкин

Полоса кислорода в области λ 8645 Å наблюдалась в спектре поглощения атмосферы при больших воздушных массах. Измерены длины волн 44 линий. По эквивалентным ширинам наиболее интенсивных линий определен интегральный коэффициент поглощения полосы $S_{0,1}$ ($S_{0,1} = (11.43 \pm 0.81) \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1} \cdot \text{км}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$ при $T = 273 \text{ К}$).

Полосу (0, 1) красной атмосферной системы полос кислорода, расположенную в области λ 8645 Å, иногда называют полосой Каплана—Мейнела. Впервые она наблюдалась Капланом в лаборатории в спектре свечения кислорода [1] и Мейнелом в спектрах свечения ночного неба и полярного сияния [2-4]. Несколько ранее Бауман и Мекке [5] при исследовании спектра Солнца в ближней инфракрасной области предположительно приписали несколько линий поглощения полосе (0, 1). Однако Бэбкок и Герцберг при анализе красной атмосферной системы полос кислорода [6] не включили ее в рассмотрение, отметив, что на их спектрограммах она не видна и необходимы дальнейшие наблюдения, чтобы установить вид полосы в поглощении.

Предварительная оценка интенсивности рассматриваемой полосы, исходя из известной интенсивности полосы (0, 0), показала, что поглощение в линиях полосы может достигать нескольких мÅ при больших воздушных массах. Поэтому была предпринята попытка выявить эту полосу в спектре заходящего Солнца. Спектрограммы были получены во втором порядке решетки 600 шт/мм с обратной линейной дисперсией 4.55 Å/мм на пластинках Kodak IV-N. Отобранные спектрограммы (три) промерены на компараторе ИЗА-2. Определение длин волн проведено относительно солнечных линий. Длины волн последних взяты из таблиц [7] и приведены к условиям наблюдения с учетом поправок на движение Земли вокруг Солнца и на вращение Земли. В результате измерений выявлены 44 линии, принадлежащие полосе (0, 1). Одна из измеренных спектрограмм приведена на рис. 1. Положения линий кислорода отмечены сбоку рисунка. В табл. 1 даны: в колонках два и шесть — измеренные длины волн, средние по трем спектрограммам, соответствующие им волновые числа, приведенные к вакууму, — в третьей и седьмой колонках, в четвертой и восьмой колонках — волновые числа, вычисленные на основании молекулярных постоянных, определенных в работе [6].

Вследствие того что наблюдаемые линии слабы, точность измерений длин волн не высока, и, следовательно, молекулярные постоянные верхнего и нижнего колебательных уровней не могут быть улучшены по сравнению с [6]. Сопоставление волновых чисел, полученных из наблюдений с вычисленными, показывает систематическое различие; полоса смещена в ультрафиолетовую сторону на величину $\Delta\nu = (0.038 \pm 0.018) \text{ см}^{-1}$. Причина такого сдвига не ясна.

Наиболее интенсивные и не блендированные линии были использованы для определения интегрального коэффициента поглощения полосы. Распределение интенсивности в отдельных полосах красной атмосферной

системы полос кислорода, согласно работам [8-10], хорошо представляется формулой

$$S_J = \frac{\nu_J}{\bar{\nu}} \frac{S_v}{Q(T)} f(J) e^{-E_J/kT}, \quad (1)$$

где S_f и S_v — интегральные коэффициенты поглощения линии и полосы соответственно, $Q(T)$ — сумма по состояниям, ν_J и $\bar{\nu}$ — волновые числа линии и полосы, $f(J)$ — фактор Хенле—Лондона, E_J — энергия нижнего уровня.

Для слабых атмосферных линий поглощения справедливо соотношение между эквивалентной шириной линии W_J и интегральным коэффициентом поглощения линии S_J , эквивалентное формуле, приведенной в работе [11] для однородного слоя газа

$$W_J = S_J l_{\text{эфф.}} \left(1 - \frac{W_J}{4\pi\gamma_{\text{эфф.}}} \right), \quad (2)$$

где $l_{\text{эфф.}}$ — слой воздуха при 1 атм и $T = 288$ К, эквивалентный числу поглощающих молекул на луче зрения, $\gamma_{\text{эфф.}}$ — полуширина коэффициента поглощения в атмосфере. Второй член в скобках для линий, использованных в настоящей работе, не превышал 2—3%. Чтобы правильно вычислить число поглощающих молекул на луче зрения, необходимо знать реальное распределение температуры T и плотности ρ с высотой, а также истинную траекторию луча.

Для вычисления $l_{\text{эфф.}}$ атмосфера разбивалась на ряд слоев (50 слоев). Каждому слою приписывались средние значения T и ρ , на основе этих средних значений вычислялась населенность различных уровней и результаты суммировались по всем слоям. Таким образом, для $l_{\text{эфф.}}$ имеем

$$l_{\text{эфф.}} = \sum_n \frac{\rho_n}{\rho_0} \frac{T_0}{T_n} e^{-\left(\frac{E_J}{kT_n} - \frac{E_J}{kT_0} \right)} \Delta l_n,$$

где T_n и ρ_n — значения температуры и плотности для n слоя, Δl_n — путь света в n слое, который для каждого слоя вычислялся с учетом кривизны Земли и изменения показателя преломления воздуха с высотой. В качестве наилучшего приближения к реальному распределению T и ρ с высотой считались данные по зондированию атмосферы ГГО в Воейково для момента, наиболее близкого к моменту наблюдения. Результаты вычислений для $l_{\text{эфф.}}$ приведены на рис. 2 для четырех моментов наблюдения, соответствующие им зенитные расстояния указаны сбоку.

Эквивалентные ширины кислородных линий поглощения были измерены на регистрограммах, полученных на микрофотометре для четырех спек-

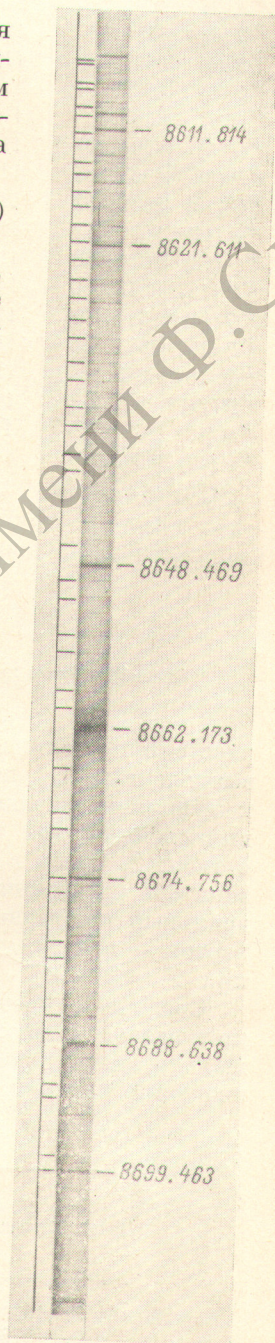


Рис. 1. Спектрограмма заходящего Солнца в области λ 8645 Å при $z=89^\circ 27'$.

трограмм. Образец регистрограммы в районе солнечной линии Ca II 8662.173 Å представлен на рис. 3. На этом же рисунке для сравнения приведена регистрограмма спектра, полученного при меньшем зенитном

Таблица 1

Линия	$\lambda, \text{Å}$	$\nu_{\text{вак.}}, \text{см}^{-1}$	$\nu_{\text{выч.}}, \text{см}^{-1}$	Линия	$\lambda, \text{Å}$	$\nu_{\text{вак.}}, \text{см}^{-1}$	$\nu_{\text{выч.}}, \text{см}^{-1}$
1	2	3	4	5	6	7	8
<i>PP</i> (1)	8646.862	11561.713	11561.678	<i>RR</i> (1)	8640.595	11570.099	11570.026
<i>PQ</i> (2)	8649.690	11557.933	11557.895	<i>RQ</i> (2)	8639.195	11571.974	11571.916
<i>PP</i> (3)	8651.263	11555.832	11555.807	<i>RR</i> (3)	8636.710	11575.304	11575.284
<i>PQ</i> (4) *	8654.377	11551.674	11551.709	<i>RQ</i> (4)	8635.253	11577.281	11577.244
<i>PP</i> (5)	8655.838	11549.724	11549.692	<i>RR</i> (5)	8632.984	11580.299	11580.294
<i>PQ</i> (6)	8659.119	11545.348	11545.313	<i>RQ</i> (6)	8631.486	11582.309	11582.291
<i>PP</i> (7)	8660.609	11543.361	11543.333	<i>RR</i> (7)	8629.399	11585.110	11585.054
<i>PQ</i> (8)	8664.107	11538.701	11538.684	<i>RQ</i> (8)	8627.916	11587.102	11587.079
<i>PP</i> (9)	8665.565	11536.754	11536.731	<i>RR</i> (9)	8626.072	11589.579	11589.564
<i>PQ</i> (10)	8669.252	11531.853	11531.815	<i>RQ</i> (10) *	8624.529	11591.652	11591.612
<i>PP</i> (11) *	8670.671	11529.966	11529.886	<i>RR</i> (11)	8622.883	11593.865	11593.821
<i>PQ</i> (12) *	8674.648	11524.680	11524.705	<i>RQ</i> (12)	8621.333	11595.949	11595.890
<i>PP</i> (13)	8676.036	11522.836	11522.797	<i>RR</i> (13)	8619.932	11597.834	11597.822
<i>PQ</i> (14) *	8680.108	11517.430	11517.353	<i>RQ</i> (14) *	8618.355	11599.956	11599.912
<i>PP</i> (15)	8681.546	11515.523	11515.465	<i>RR</i> (15)	8617.105	11601.639	11601.566
<i>PQ</i> (16)	8685.855	11509.810	11509.758	<i>RQ</i> (16)	8615.577	11603.696	11603.675
<i>PP</i> (17) *	8687.221	11508.000	11507.889	<i>RR</i> (17)	8614.547	11605.084	11605.050
<i>PQ</i> (18)	8691.759	11504.992	11504.918	<i>RQ</i> (18) *	8612.974	11607.203	11607.178
<i>PP</i> (19) *	8693.167	11500.129	11500.063	<i>RR</i> (19)	8612.163	11608.296	11608.270
<i>PQ</i> (20)	8697.885	11493.891	11493.833	<i>RQ</i> (20) *	8610.609	11610.391	11610.416
				<i>RR</i> (21)	8609.941	11611.292	11611.225
				<i>RQ</i> (22) *	8608.343	11613.447	11613.388
				<i>RR</i> (23)	8607.976	11613.943	11613.909
				<i>RQ</i> (24) *	8606.366	11616.115	11616.091

* Блендированные линии.

расстоянии Солнца. Используя измеренные эквивалентные ширины и вычисленные $I_{\text{эфф.}}$ по формулам (1), (2), можно определить интегральный коэффициент поглощения полосы. Интегральный коэффициент поглощения, вычисленный для каждой спектрограммы по 20—22 линиям, приведен в табл. 2. Здесь в первом столбце дана дата наблюдения, во втором — зенитное расстояние Солнца за пределами атмосферы, в третьем — интегральный коэффициент поглощения для воздуха при $T = 288 \text{ K}$, в четвертом — интегральный коэффициент поглощения для чистого кислорода при $T = 273 \text{ K}$.

Среднее и средне-взвешенное значения интегрального коэффициента поглощения мало отличаются друг от друга. Однако ошибка, соответствующая среднему значению, по-видимому, более реальна, так как точность значений для отдельных спектрограмм определяется, помимо точности

Таблица 2

Дата наблюдения	Зенитное расстояние Солнца	$S_{0,1} \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1} \cdot \text{км}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$	
		для воздуха, $T = 288 \text{ K}$	для кислорода, $T = 273 \text{ K}$
5.9.1975	89°27'	3.28 ± 0.54	10.7 ± 1.8
9.9.1975	87°50'	3.80 ± 0.50	12.4 ± 1.6
5.10.1975	89°17'	3.61 ± 0.42	11.8 ± 1.4
	89°48'	3.31 ± 0.54	10.8 ± 1.8
Среднее		3.50 ± 0.25	11.4 ± 0.8
Среднее взвешенное		3.52 ± 0.12	11.5 ± 0.4

измерения эквивалентных ширин, еще неопределенностью модели атмосферы, неопределенностью траектории луча и т. д.

Среднее значение интегрального коэффициента поглощения можно сравнить с относительными измерениями, проведенными в работах [12, 13], где для отношения интенсивности излучения полосы (0, 1) к полосе (0, 0) в фотонах получены значения 0.05 ± 0.01 и 0.0725 ± 0.0032 соответственно. Если пересчитать наше значение интенсивности в поглощении в относительные интенсивности в излучении в фотонах, используя для полосы (0, 0) значение из работы [8], получим 0.0606 ± 0.0066 . Отношение ин-

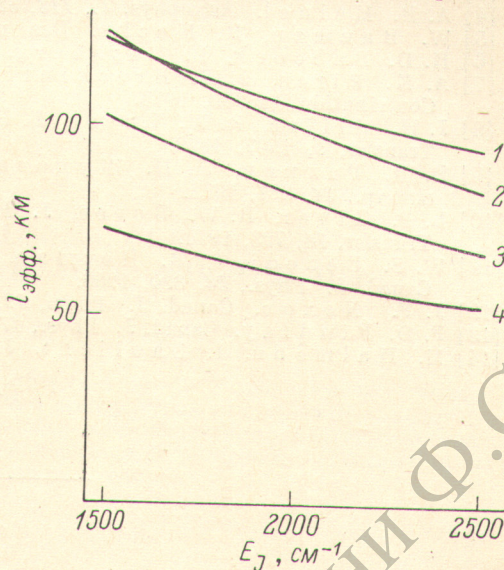


Рис. 2. Однородный слой воздуха при 1 атм и $T=288$ К, эквивалентный числу поглощающих молекул, находящихся на луче зрения в атмосфере.

1 — $89^{\circ}27'$, 2 — $89^{\circ}48'$, 3 — $89^{\circ}17'$, 4 — $87^{\circ}50'$.

тенсивности этих полос, вычисленное с использованием факторов Франка—Кондона [14] и в предположении постоянства электронного момента перехода, равно 0.049. Если различие вычисленного и измеренного отношений

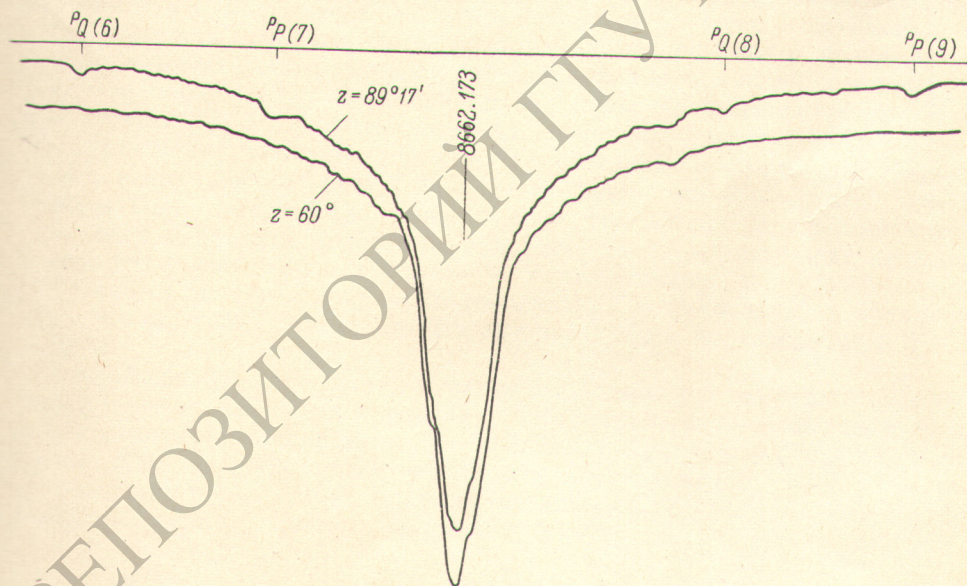


Рис. 3. Регистрограммы спектра Солнца в окрестности солнечной линии 8662.173 Å при двух зенитных расстояниях.

интенсивностей полос интерпретировать как изменение электронного момента перехода $Re(r_{v'v''})$ в зависимости от межъядерного расстояния $r_{v'v''}$, то для $\left| \frac{R_e(r_{0,1})}{R_e(r_{0,0})} \right|^2$, по данным [12, 13] и настоящей работы, получим 1.01 ± 0.20 , 1.47 ± 0.06 , 1.22 ± 0.13 .

Литература

- [1] J. Kaplan. *Nature*, *159*, 673, 1947.
[2] A. B. Meinel. *P. A. S. P.*, *60*, 373, 1948.
[3] A. B. Meinel. *Astrophys. J.*, *112*, 464, 1950.
[4] A. B. Meinel. *Astrophys. J.*, *113*, 583, 1951.
[5] W. Bauman, R. Mecke. *Das ultrarote Sonnenspektrum*. Leipzig, 1934.
[6] H. D. Babcock, L. Herzberg. *Astrophys. J.*, *108*, 167, 1948.
[7] A. K. Pirce, J. B. Breckinridge. Kitt Peak National Observatory. Contribution № 559, 1973.
[8] J. H. Miller, R. W. Boese, L. P. Giver. *J. Quant. Spectr. and Rad. Transfer*, *9*, 1507, 1969.
[9] В. Д. Галкин, Л. Н. Жукова, Л. А. Митрофанова. *Опт. и спектр.*, *34*, 837, 1972.
[10] L. P. Giver, R. W. Boese, J. H. Miller. *J. Quant. Spectr. and Rad. Transfer*, *14*, 793, 1974.
[11] W. S. Benedict, R. Herman, G. E. Moore, S. Silverman. *Canad. J. Phys.*, *34*, 830, 1956.
[12] J. F. Noxon. *Canad. J. Phys.*, *39*, 1110, 1961.
[13] F. D. Findlay. *Canad. J. Phys.*, *47*, 687, 1969.
[14] M. Halmann, I. Laulicht. *J. Chem. Phys.*, *43*, 438, 1965.

Поступило в Редакцию 9 марта 1976 г.