

СДВИГ ЛИНИЙ В ПОЛОСЕ «А» КИСЛОРОДА  
В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ДАВЛЕНИЯ

В. Д. Галкин

Для давлений меньше одной атмосферы измерена величина смещения линии поглощения кислорода в полосе А в зависимости от давления. Полученное значение сдвига при изменении давления на 1 атм.  $\delta\sigma = (0.0063 \pm 0.0011) \text{ см}^{-1}$ . Коэффициент поглощения для всей атмосферы, вычисленный с учетом сдвига, асимметричен и смещен в сторону больших длин волн. Характер асимметрии линий поглощения изменяется в зависимости от энергии нижнего уровня  $E$ , причем с увеличением  $E$  асимметрия уменьшается, но увеличивается сдвиг линии в целом. Вследствие асимметрии коэффициента поглощения положение линии изменяется с увеличением эквивалентной ширины линии. Однако максимальная асимметрия и соответственно максимальное изменение положения линии с увеличением ее интенсивности не превышает 0.002 Å.

Атмосферные линии поглощения являются удобными реперами при измерении длин волн в спектрах небесных объектов. Атмосферные линии кислорода часто используются для определения инструментального профиля спектрографа. Кроме этих узких задач, асимметрия теллурических линий представляет большой интерес для изучения физики атмосферы. В связи с этим желательно исследовать стабильность положения и профиля линий поглощения в атмосфере. Одним из факторов, влияющих на положение и форму атмосферных линий, может быть сдвиг линий в зависимости от давления.

Возможность сдвига линий от давления в ближайшей инфракрасной атмосферной системе полос кислорода обсуждалась Г. Ван де Хюлстом [1]. Из теоретических соображений Ван де Хюлст оценил величину сдвига и рассмотрел коэффициент поглощения кислородной линии с учетом сдвига в изотермической атмосфере. Коэффициент поглощения оказался асимметричным и смещенным в красную сторону, причем величина смещения центра тяжести коэффициента поглощения менялась по высоте от  $0.54 \cdot 10^{-6} \lambda$  для пикового значения до  $1.64 \cdot 10^{-6} \lambda$  у основания.

Исходя из этого, можно было ожидать, что атмосферные линии будут асимметричны и длины волн будут различаться в зависимости от того, измерены ли они в теллурическом спектре, полученном в горной обсерватории или расположенной на уровне моря, или в спектре лабораторного источника света. Длины волн должны также зависеть немного от зенитного расстояния источника. Г. Ван де Хюлст отметил, однако, что, согласно исследованиям, проведенным в обсерватории Маунт-Вилсон, все эти эффекты не наблюдаются.

Позднее асимметрия атмосферных линий в полосе  $\alpha$  кислорода была отмечена Карпинским [2] при исследовании инструментального контура спектрофотометра. Максимальное смещение центра тяжести в линии порядка 7 мÅ было близко к значению, предсказанному в работе [1], однако без дополнительных исследований было неясно, обусловлена ли эта асимметрия линий физическими явлениями в кислороде или имеет инструментальное происхождение.

Сдвиг линий в полосе «А» кислорода от давления был недавно обнаружен Адикс и Диановым—Клоковым [3]. В работе [3] исследовался

профиль линии поглощения при прохождении света через кювету со сжатым воздухом при давлении 11 и 16 атм. Воздух в спектрографе находился при атмосферном давлении. Наблюдаемые профили сравнивались с вычисленными. Согласие было наилучшим, если при вычислении профиля предположить, что линия поглощения при 11 (16) атм. смещена относительно линии поглощения при 1 атм. на  $0.076$  ( $0.12$ )  $\text{см}^{-1}$  в сторону больших длин волн. Это позволило предположить, что сдвиг пропорционален давлению, и определить величину сдвига на единицу изменения давления  $\delta\sigma = 0.0078 \text{ см}^{-1}$ .

Представляет, однако, интерес проверить, можно ли экстраполировать величину сдвига, полученную при давлениях порядка 10 атм., на давления которые имеют место в атмосфере земли.

В настоящей работе сдвиг измерен другим методом для давлений меньше одной атмосферы, а также рассмотрено положение и профиль атмосферных линий кислорода с учетом сдвига.

### Методика эксперимента. Результаты

Для определения величины сдвига измерялось положение линий в спектре поглощения воздуха при давлениях 0.1, 0.3 атм. относительно линий в спектре поглощения воздуха при давлении 1 атм. Спектры поглощения при 0.1 (0.3) и 1 атм. фотографировались одновременно, непосредственно друг под другом. Схема установки дана на рис. 1. Геометрические пути составляли 500, 100 и 40 м при 0.1, 0.3 и 1 атм. соответственно. Интенсивности линий для всех трех условий практически были одинаковые.

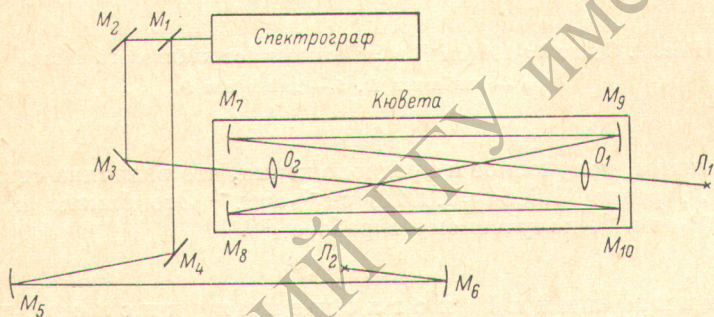


Рис. 1. Оптическая схема установки.

Зеркала  $M_1, M_2, M_3, M_4$  — плоские,  $M_7, M_8, M_9, M_{10}$  — сферические с радиусом кривизны 97 м;  $M_5, M_6$  — сферические,  $O_1, O_2$  — линзы,  $L_1, L_2$  — лампы накаливания.

Величина сдвига ожидалась малой, поэтому для дополнительного контроля спектры были получены во 2-м, 3-м и 4-м порядках с обратной линейной дисперсией 1.6, 0.87 и 0.36  $\text{Å}/\text{мм}$ . Спектрограф во время эксперимента откачивался до давлений  $\sim 1/1000$  атм.

Измерялись линии  $R_2 - R_{15}$  в ветви  $R$  ( $R_2 - R_7$  в 4-м порядке) и  $P_2 - P_{15}$  в ветви  $P$ . Измерения проводились на компараторе ИЗА-2 при четырех положениях негатива спектра на его столике. При каждом положении фотопластины делалось 5 наведений на каждую линию в обоих спектрах. Значения смещения, усредненные по всем линиям, для каждого негатива представлены в таблице. С учетом всех линий каждое такое значение является средним  $\sim 500$  измерений.

Сравнение смещений при разностях давлений ( $0.1 \div 1$ ) и ( $0.3 \div 1$ ) атм. показывает, что сдвиг пропорционален давлению, причем большему давлению соответствует большая длина волны.

Величина сдвига на единицу давления в виде средневзвешенного из шести спектров была вычислена отдельно для каждой линии (рис. 2). Из рис. 2 видно, что имеется некоторая тенденция к уменьшению сдвига с увеличением квантового числа  $J$ . Сплошной линией для сравнения по-

Порядок спектра	Обратная дисперсия, Å/мм	Смещение при разности давлений, атм			
		1±0.3	1±0.3	1±0.1	1±0.1
		мкм	см <sup>-1</sup>	мкм	см <sup>-1</sup>
2-й	1.60	1.2±1.9	(3.3±5.2)·10 <sup>-3</sup>	1.9±2.2	(5.6±6.5)·10 <sup>-3</sup>
3-й	0.87	2.1±2.4	(3.1±3.8)·10 <sup>-3</sup>	3.4±2.2	(5.4±3.3)·10 <sup>-3</sup>
4-й	0.36	7.2±3.0	(4.7±2.0)·10 <sup>-3</sup>	10.8±5.0	(7.0±3.2)·10 <sup>-3</sup>

казано относительное изменение полуширины линии с  $J$  [4, 5]. Данные, однако, немногочисленны, чтобы с уверенностью говорить, что сдвиг изменяется с  $J$  аналогично полуширинам. Средневзвешенное значение сдвига

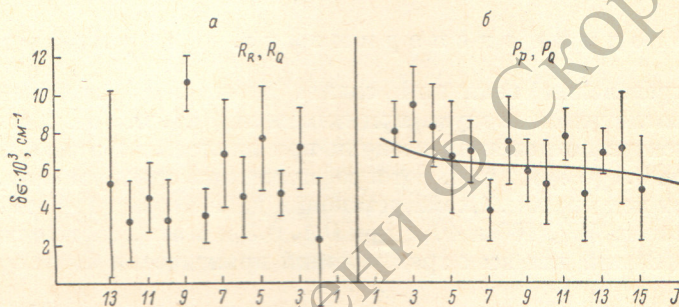


Рис. 2. Сдвиг  $\delta\sigma \cdot 10^3$  (см<sup>-1</sup>) в зависимости от квантового числа. а — для ветви R, б — для ветви P

по всем линиям, полученное в предположении, что величина сдвига не зависит от  $J$ , равно  $(0.0064 \pm 0.0011)$  см<sup>-1</sup>·атм.<sup>-1</sup>. Это близко к значению  $0.0078$  см<sup>-1</sup>·атм.<sup>-1</sup>, полученному в работе [3].

### Сдвиг линий поглощения кислорода в атмосфере

В атмосфере с высотой происходит смещение положения и изменение профиля коэффициента поглощения. Для вычисления коэффициента поглощения  $k$ , кислородной линии всей атмосферы последняя предполагалась слоистой, состоящей из 17 слоев до высоты 40 км. Разбиение на слои производилось таким образом, чтобы каждый слой давал примерно одинаковый вклад в области центральной частоты. Для каждого слоя на основе средних значений температуры и плотности, взятых из стандартной модели атмосферы СМА СССР [6], вычислялись частота максимума и форма коэффициента поглощения.

Предполагалось, что форма коэффициента поглощения определяется совместным действием доплеровского уширения и уширения давлением лорентцевского типа. Вычисления были проведены для линий с разным значением энергии нижнего уровня  $E$ , так как в связи с изменением температуры с высотой вклад данного слоя в суммарный коэффициент поглощения будет зависеть от  $E$ . Во всех случаях принималось, что полуширина лорентцевского коэффициента поглощения при атмосферном давлении  $\gamma_0 = 0.05$  см<sup>-1</sup>, а величина сдвига  $\delta\sigma = 0.0063$  (см·атм.)<sup>-1</sup>. Профили коэффициента поглощения для всей атмосферы, полученные в результате суммирования по всем слоям, имеют лорентцевскую форму, но различную полуширину и разную асимметрию. Изменение полуширины в зависимости от  $E$  близко соответствует изменению эффективной полуширины, вы-

численному в работе [1]. Смещение центра тяжести коэффициента поглощения в зависимости от отношения  $k_y/k_{\max}$  для разных значений энергии нижнего уровня приведено на рис. 3.

Так как профиль слабой линии соответствует профилю коэффициента поглощения, то для нее смещение центра тяжести в линии от ее глубины также будет соответствовать рис. 3. С увеличением насыщения в линии характер асимметрии линии будет изменяться, так как данной глубине линии будут соответствовать разные части профиля коэффициента поглощения. Для иллюстрации на рис. 4 представлено смещение центра тяжести

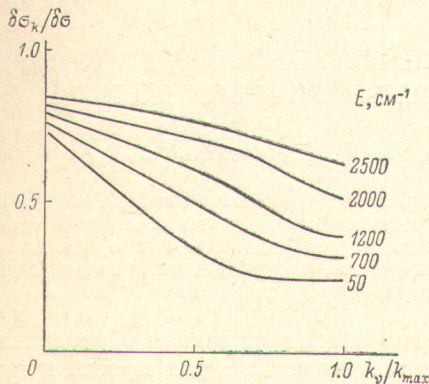


Рис. 3. Смещение центра тяжести коэффициента поглощения кислородной линии в атмосфере в зависимости от  $k_y/k_{\max}$  для линий с различной энергией  $E$  нижнего уровня.

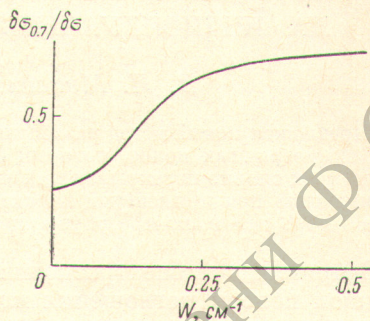


Рис. 4. Смещение центра тяжести линий поглощения на глубине 0.7 в зависимости от эквивалентной ширины  $W$  линии с  $E=50 \text{ cm}^{-1}$ .

линии на ее глубине 0.7 в зависимости от эквивалентной ширины  $W$ , вычисленное с использованием коэффициента поглощения, обладающего наибольшей асимметрией ( $E=50 \text{ cm}^{-1}$ ). Из рис. 4 можно заключить, что положение линии наиболее сильно зависит от зенитного расстояния (интенсивность линии растет с зенитным расстоянием), когда ее эквивалентная ширина возрастает от 0.05 до 0.20  $\text{cm}^{-1}$ . Как следует из приведенных рисунков, наибольшая асимметрия свойственна линиям с низкими значениями энергии нижнего уровня и соответственно положение этих линий наиболее сильно зависит от эквивалентной ширины линии. Однако максимальная асимметрия и соответственно наибольшее изменение длины волны линий поглощения кислорода в атмосфере не превышает 0.002 Å. Эта величина находится на пределе точности определения профилей линий и измерения положений линий, достижимой с помощью солнечных спектрографов с наибольшей разрешающей силой.

#### Литература

- [1] H. C. Van de Hulst. Ann. Ap., 8, 1, 1945.
- [2] В. Н. Карпинский. Изв. ГАО, 178, 84, 1965.
- [3] Т. Г. Адикс, В. Н. Дианов-Клоков. Опт. и спектр., 30, 205, 1971.
- [4] D. E. Burch, D. A. Gryvnak. Appl. Opt., 8, 1493, 1969.
- [5] J. H. Miller, R. W. Voese, L. P. Giver. J. Quant. Spectr. and Radiat. Trans., 9, 1507, 1969.
- [6] Ю. А. Глаголев. Справочник по физическим параметрам атмосферы. 1970.

Поступило в Редакцию 21 апреля 1972 г.