

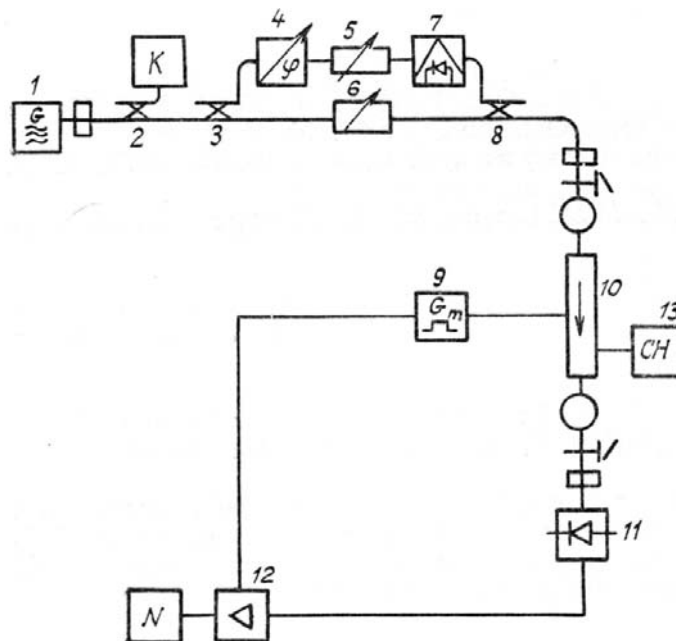
А.А. Власов, Е.Н. Кадыгров, Е.А. Куклин, В.В. Глызин, О.А. Ловцова

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ O_2 В ПОЛОСЕ 5 ММ ПРИ НИЗКИХ ДАВЛЕНИЯХ

Описана спектрометрическая установка для измерения коэффициента поглощения молекулярного кислорода в полосе поглощения 5 мм при низких давлениях. Приводятся результаты измерения интенсивностей спектральных линий на резонансных частотах в диапазоне 54–65 ГГц. Экспериментальные данные сравниваются с результатами теоретических расчетов по модели Розенкранца.

Исследование поглощающих свойств атмосферных газов имеет важное значение для дистанционного контроля состояния атмосферы. В частности, изучение зависимости коэффициента поглощения γ молекулярного кислорода от частоты ν , давления P и температуры T позволяет определять высотный профиль температуры атмосферы по измерениям характеристик восходящего радиоизлучения [1, 2]. В настоящее время есть много моделей расчета коэффициента поглощения O_2 [3–7], однако расхождение между ними достигает десятков процентов при некоторых значениях ν , P , T [8, 9]. В [10] прямо указано, что «современное состояние знаний о коэффициенте поглощения кислорода применительно к задаче температурного зондирования атмосферы нельзя признать удовлетворительным». При таком положении резко возрастает роль экспериментальных исследований зависимости $\gamma(\nu, P, T)$.

Для измерения значений коэффициента поглощения O_2 в диапазоне частот 54–65 ГГц при $T = 150–350^\circ K$ и $P = 0,1–10$ мм рт. ст. была создана спектрометрическая установка. Определение интенсивности поглощения линий O_2 при таких низких давлениях, соответствующих слоям атмосферы на высотах 30–60 км, проводится путем измерения ослабления СВЧ-излучения в волноводной ячейке [11]. Установка собрана по схеме микроволнового спектрометра с молекулярной модуляцией, для осуществления которой используется эффект Зеемана (молекула O_2 обладает магнитным дипольным моментом). На рисунке показана структурная схема установки. Задающий генератор СВЧ 1 выдает сигнал, часть которого через направленный ответвитель 3 поступает в калибровочный канал, в котором установлены фазовращатель 4, аттенюатор 5 и *pin*-модулятор 7. Модулятор на *pin*-диоде создает 100%-ю амплитудную модуляцию сигнала с частотой, которая задается опорным генератором модулятора магнитного поля 9. Сигнал, прошедший через эти элементы, направленным ответвителем 8 смешивается с сигналом измерительного канала. Далее сигнал проходит измерительную ячейку 10 и поступает на СВЧ-детектор 11.



Структурная схема установки: 1 – СВЧ-генератор; 2, 3, 8 – направленные ответвители; 4 – фазовращатель; 5, 6 – аттенюаторы; 7 – *pin*-модулятор; 9 – модулятор магнитного поля; 10 – измерительная ячейка; 11 – СВЧ-детектор; 12 – усилитель; 13 – блок подготовки газовой смеси

Измерительная ячейка представляет собой герметизированный волновод длиной 1 м, выполненный из посеребренной стеклянной трубки диаметром 12 мм. Обмотка соленоида, предназначенного для модуляции, намотана непосредственно на корпус ячейки. Поверх модулирующего соленоида намотан соленоид, создающий постоянное магнитное поле, компенсирующее поле Земли при соответствующей ориентации измерительной ячейки вдоль его силовых линий. Необходимость компенсации вызвана тем, что при давлениях меньше 1 мм рт. ст. ширина линии O₂ становится сравнимой с расстояниями между компонентами, на которые расщепляется каждая линия в магнитном поле Земли из-за эффекта Зеемана. Это приводит к дополнительной погрешности измерения коэффициента поглощения. Концентрация кислорода и давление смеси в ячейке задается с помощью блока подготовки газовой смеси [3]. Температура ячейки задается системой термостатирования.

Расчет коэффициента поглощения γ [см⁻¹] производится по формуле [12]

$$\gamma = \frac{2}{L} e^{-\alpha D} (1 - e^{-\alpha d}), \quad (1)$$

где L — длина ячейки, см; D — разность ослаблений в каналах, дБ; d — глубина модуляции, дБ, $\alpha = \ln 10/20$.

Согласно (1) относительная погрешность измерения коэффициента поглощения равна

$$\frac{\delta\gamma}{\gamma} = -\frac{\delta L}{L} - \alpha \cdot \delta D + \alpha \cdot \delta d / (e^{\alpha d} - 1), \quad (2)$$

где δL , δD , δd — ошибки измерения L , D , d .

Ошибки δD , δd обусловлены влиянием паразитных сигналов и отражений, погрешностями градуировки аттенуаторов, погрешностями сравнения из-за шумов и наводок.

Таблица 1

γ , см ⁻¹	D , дБ	$\alpha \cdot \delta D$, %	$\frac{\alpha \cdot \delta d}{e^{\alpha d} - 1}$, %	$\frac{\delta\gamma}{\gamma}$, %
$2 \cdot 10^{-7}$	100	20	3	23
$2 \cdot 10^{-6}$	80	11	3	14
$2 \cdot 10^{-5}$	60	9	3	12

В табл. 1 приведены оценки вкладов этих ошибок при различных значениях γ , кроме ошибки измерения длины ячейки, которой можно пренебречь (0,1% при $L = 1$ м и $\delta L = 1$ мм).

Таблица 2

Коэффициент поглощения молекулярного кислорода

№ линии	Частота линии, МГц	$\bar{\gamma}$, см ⁻¹	δ , %
1+	56264,78	$(4,71 \pm 0,25) 10^{-6}$	-10
3+	58446,60	$(1,195 \pm 0,031) 10^{-5}$	-18
5+	59590,98	$(1,70 \pm 0,25) 10^{-5}$	-22
7+	60434,78	$(2,66 \pm 0,07) 10^{-5}$	8,2
9+	61150,57	$(2,18 \pm 0,02) 10^{-5}$	-15
11+	61800,17	$(2,39 \pm 0,04) 10^{-5}$	2,9
13+	62411,22	$(1,99 \pm 0,07) 10^{-5}$	1,5
15+	62998,00	$(1,025 \pm 0,012) 10^{-5}$	-48
17+	63568,52	$(8,48 \pm 0,32) 10^{-6}$	-29
19+	64127,78	$(7,66 \pm 0,05) 10^{-6}$	2,6
21+	64678,92	$(6,10 \pm 0,036) 10^{-6}$	23
23+	65224,08	$(2,69 \pm 0,037) 10^{-6}$	-3,7

Таким образом, относительная погрешность измерения коэффициента поглощения γ не превышает 14% при $\gamma > 2 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-1}$. Эти значения погрешности являются предварительными, их следует уточнить на основе статистического анализа эмпирических данных (см. ниже).

В табл. 2 приведены результаты измерений коэффициента поглощения O_2 на резонансных частотах линий с квантовыми номерами $1^+ - 23^+$ при давлении 1 мм рт. ст. и температуре 295°К. Для оценки случайных ошибок на каждой резонансной частоте было сделано 7–9 измерений для линий $1^+ - 17^+$ и 5–6 измерений для линий $19^+, 21^+, 23^+$. Видно, что значения ошибок лежат в пределах 1–5%, кроме линии 5^+ , для которой ошибка оказалась равной 14%. В табл. 3 приведены данные измерений коэффициента поглощения O_2 на резонансных частотах линий с квантовыми номерами $3^- - 23^-$ при тех же условиях. Здесь для каждой линии было сделано 4–5 измерений, ошибки составляют всего лишь 1–3%.

Таблица 3

Коэффициент поглощения молекулярного кислорода

№ линии	Частота линии, МГц	$\bar{\gamma}$, см^{-1}	δ , %
3-	62486,25	$(1,54 \pm 0,04) 10^{-5}$	–3,9
5-	60396,057	$(1,67 \pm 0,05) 10^{-5}$	–27
7-	59164,204	$(1,83 \pm 0,02) 10^{-5}$	–28
9-	58323,874	$(1,6 \pm 0,01) 10^{-5}$	–42
11-	57612,481	$(1,825 \pm 0,017) 10^{-5}$	–9,8
13-	56968,180	$(1,77 \pm 0,03) 10^{-5}$	7,9
15-	56363,387	$(1,14 \pm 0,02) 10^{-5}$	–7
17-	55783,800	$(1,01 \pm 0,02) 10^{-5}$	15,8
19-	55221,365	$(0,7 \pm 0,02) 10^{-5}$	21
21-	54671,157	$(0,424 \pm 0,006) 10^{-5}$	19
23-	54,129999	$(2,66 \pm 0,06) 10^{-6}$	29
25-	53,595748	$(1,5 \pm 0,01) 10^{-6}$	

Для сравнения полученных экспериментальных данных $\gamma_э$ с теоретическими γ_p в табл. 2 и 3 приведены значения отклонения $\delta = [(\gamma_э - \gamma_p) / \gamma_э] \cdot 100\%$. Значения $\gamma_э$ рассчитывались по модели Розенкранца [5], в которой учитывается интерференция линий в первом приближении. Согласно модели Розенкранца коэффициент поглощения вычисляется следующим образом:

$$\gamma = CP^2 \frac{\nu^2}{T^2} \left\{ \sum_N \varepsilon_N [f_{N+}(\nu) + f_{N+}(-\nu) + f_{N-}(\nu) + f_{N-}(-\nu)] + \frac{0,7 \omega_b}{\nu^2 + P^2 \omega_b^2} \right\}, \quad (3)$$

где $C = 0,18 \cdot 10^{-5}$ – константа для вычисления γ в см^{-1} , P в мм рт. ст., ν в гигагерцах (ГГц), суммирование ведется по нечетным состояниям от 1 до 39; населенность состояния N

$$\varepsilon_N = \frac{2N+1}{0,725T} \exp \left[-2,07 \frac{N(N+1)}{T} \right]; \quad (4)$$

форма линий

$$f_{N\pm}(\nu) = \frac{\omega_N d_{N\pm}^2 + (\nu - \nu_{N\pm}) \cdot Y_{N\pm}}{(\nu - \nu_{N\pm})^2 + (P\omega_N)^2}; \quad (5)$$

амплитуды линий ν_{N^+}, ν_{N^-}

$$d_{N^+} = \left[\frac{N(2N+3)}{(N+1)(2N+1)} \right]^{1/2}; \quad (6)$$

$$d_{N^-} = \left[\frac{(N+1)(2N-1)}{N(2N+1)} \right]^{1/2}; \quad (7)$$

нерезонансная ширина линии

$$\omega_b = 0,64 \cdot 10^{-3} \left(\frac{300}{T} \right)^{0,89}, \quad (8)$$

интерференционные коэффициенты связи между соседними состояниями из-за столкновений молекул

$$Y_{N\pm} = d_{N\pm} \left[\frac{2d_{N\pm+2} \cdot \omega_{NU}}{\nu_{N\pm} - \nu_{N\pm+2}} - \frac{2d_{N\pm-2} \cdot \omega_{ND}}{\nu_{N\pm} - \nu_{N\pm-2}} - \frac{\omega_b}{\nu_{N\pm}} - \frac{\omega_b}{\nu_{N\pm} + 60} \right]; \quad (9)$$

резонансные полуширины

$$\omega_N = 1,55 \cdot 10^{-3} \left(\frac{300}{T} \right)^{0,85}; \quad (10)$$

уширение линий из-за столкновений вычисляются последовательно по формулам

$$\omega_{ND} = \omega_b - \omega_N - \omega_{NU}; \quad (11)$$

$$\omega_{N-2,U} = \omega_{ND} \frac{\varepsilon_N}{\varepsilon_{N-2}}. \quad (12)$$

Вычисления коэффициента поглощения производились с помощью специальной программы на основе формул (3–12).

Сопоставление эмпирических и расчетных значений позволяет сделать следующие выводы. Для линий 11^+ , 13^+ , 19^+ , 23^+ расхождение δ не превышает 4%, для линий 1^+ , 7^+ , 9^+ — меньше 14%. Для линий 3^- , 11^- , 13^- , 15^- отличие экспериментальных значений от теоретических меньше 14%. Следует отметить, что величина δ для каждой линии больше случайной ошибки, кроме линии 13^+ ($\delta = 1,5\%$, случайная ошибка 3,5%). На основе анализа данных, полученных с помощью этой установки, можно произвести выбор модели расчета коэффициента поглощения, оптимальной для конкретной решаемой задачи.

1. Кондратьев К. Я., Тимофеев Ю. М. Термическое зондирование атмосферы со спутников. Л.: Гидрометеоздат, 1970. 410 с.
2. Кадыгров Е. Н., Шапошников А. Н. // II Всес. школа-симпозиум по распространению мм и сбмм волн в атмосфере. (Тезисы докл.). Фрунзе: Илим, 1986. С. 142–145.
3. Van Vleck J. H. // Phys. Rev. 1947. V. 71. № 7. P. 413–424.
4. Meeks M. L., Lilley A. E. // J. Geophys. Res. 1963. V. 68. № 6. P. 1683–1703.
5. Rosenkranz P. W. // IEEE Trans. 1975. V. AP-23. № 4. P. 498–506.
6. Lam K. S. // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 1977. № 3. P. 351–384.
7. Жевакин С. А., Наумов А. П. // Изв. вузов. Радиофизика. 1967. Т. 10. № 9. С. 1213–1243.
8. Власов А. А., Кадыгров Е. Н., Шапошников А. Н. // Всес. конф. «Использование спутниковой информации в исследовании океана и атмосферы». (Тезисы докл.). М.: Изд. ИО АН СССР, 1989. С. 110.
9. Наумов А. П. // Тр. I Всес. школы-симпозиума по распространению мм и сбмм волн в атмосфере. М.: Изд. ИРЭ АН СССР 1983. С. 21–46.
10. Жевакин С. А. // Там же. С. 261–279.
11. Таунс Ч., Шавлов А. Радиоспектроскопия. М.: ИЛ, 1959. 756 с.
12. Коваль А. А. // Техника средств связи. Сер. Радиоизм. техника. 1982. Вып. 6. С. 32–36.

Центральная аэрологическая обсерватория, Долгопрудный,
НПО «Эталон», Иркутск

Поступила в редакцию
20 ноября 1989 г.

A. A. Vlasov, E. N. Kadygrov, E. A. Kuklin, V. V. Glizin, O. A. Lovtsova. **Experimental Determination of Spectral Line Intensities in the 5 mm O₂ Band at Low Pressures.**

Device is described for oxygen absorption coefficient measurements in the 5 mm band at low pressures. The results of spectral line intensity measurements at resonant frequencies in the range 54–65 GHz are presented. The experimental data are compared with the results of theoretical calculations according to Rosenkranz's model.