

Т.М. Кадошникова, В.И. Сердюков, Л.Н. Синица

**ВНУТРИРЕЗОНАТОРНАЯ ЛАЗЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ  
АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА В ОБЛАСТИ 0,88—1,03 МКМ**

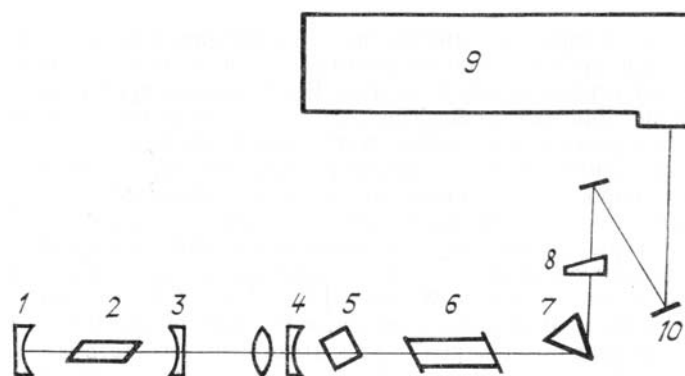
Исследованы спектры поглощения атмосферного воздуха в области 0,88—1,03 мкм с помощью внутрирезонаторного спектрометра на основе лазера на  $F_2^+$ —центрах окраски в кристалле LiF. Спектрометр обладает пороговой чувствительностью к поглощению  $8 \cdot 10^{-8} \text{ см}^{-1}$  и спектральным разрешением  $0,05 \text{ см}^{-1}$ . Определено, что основной поглощающей компонентой атмосферного воздуха в данном диапазоне являются пары воды. Зарегистрировано около 300 линий поглощения  $\text{H}_2\text{O}$ . Определены микроокна прозрачности.

Развитие лазеров и широкое их использование в задачах атмосферной оптики требует знания спектров поглощения атмосферного воздуха и его основных компонентов. В настоящее время информация о спектрах поглощения атмосферного воздуха в области частот выше  $8000 \text{ см}^{-1}$  содержится в основном в атласах солнечного спектра атмосферы [1, 2], однако наличие неконтролируемых примесей атмосферы и солнечной короны затрудняет анализ и использование этих данных.

Широкие возможности исследования слабых спектров поглощения атмосферы открыл метод внутрирезонаторной (ВР) лазерной спектроскопии, с помощью которого спектры поглощения атмосферы зарегистрированы в области 1,05—1,08 мкм [3], 1,09—1,2 мкм [4], 0,583—0,637 мкм [5, 6, 7]. В области излучения  $F_2^+$ : LiF-лазера 0,9—1 мкм лабораторные измерения центров линий атмосферы отсутствуют, а исследования спектров в работах [8, 9] носят лишь иллюстративный характер.

**Внутрирезонаторный лазерный спектрометр**

В настоящей работе спектр поглощения атмосферного воздуха исследован методом ВР-спектроскопии в области 0,88—1,03 мкм. Схема спектрометра приведена на рис. 1. Резонатор лазера ВР-спектрометра образован 90% плоским 8 и 99,9% сферическим 4 зеркалом и дисперсионной призмой из СТФ—27. В качестве активного элемента 5 используется кристалл LiF с  $F_2^+$ —центрами окраски размером  $40 \times 10 \times 10 \text{ мм}^3$ , расположенный в резонаторе под углом Брюстера. Кристалл LiF со стабилизированными  $F_2^+$ —центрами окраски изготовлен в НИИ прикладной физики при Иркутском университете. Стабилизированные центры окраски устойчиво работают при комнатной температуре.

Рис. 1. Схема ВРЛ-спектрометра на основе LiF:  $F_2^+$ :OH

Накачка  $F_2^+$ : LiF-лазера осуществлялась по продольной схеме с помощью рубинового лазера с длительностью квазинепрерывной генерации 900 мкс и энергией 5 Дж. Резонатор рубинового лазера образован сферическим 99% зеркалом 1, активным элементом длиной 170 мм 2 и выходным плоским 50%-ным зеркалом 3. Применение рубинового лазера с длительностью генерации 900 мкс позволило получить квазинепрерывную генерацию  $F_2^+$ : LiF-лазера длительностью 500 мкс.

Регистрация спектра излучения лазера осуществлялась на спектрографе 9, собранном на основе автоколлимационной камеры УФ—90 и дифракционной решетки 300 штр/мм. Обратная линейная дисперсия спектрографа составляла  $0,1 \text{ нм/мм}$ , спектральное разрешение —  $0,05 \text{ см}^{-1}$ , методика определения положения центров линий обеспечивала погрешность менее  $0,05 \text{ см}^{-1}$ .

Углубление провалов в ВРЛ-спектре из-за линий поглощения происходит во времени по экспоненциальному закону. При регистрации интегрального по времени ВРЛ-спектра глубокие провалы в конце генерации складываются с малыми провалами в начале генерации, в результате чего чувствительность ВР-спектрометра уменьшается. Мы использовали модифицированную методику регистрации интегрального по времени ВРЛ-спектра, при которой спектр излучения лазера разворачивался вдоль щели спектрографа с помощью вращающегося зеркала (10), а на фотопленке регистрировалась конечная часть ВРЛ-спектра  $\Phi(\nu)$  с уже сформировавшимися глубокими провалами:

$$\Phi(\nu) = \int_{t_1}^{t_2} I(t) \exp(-\kappa(\nu) ct) dt / \int_{t_1}^{t_2} I(t) dt, \quad (1)$$

где  $\kappa(\nu)$  — коэффициент поглощения;  $c$  — скорость света;  $I(t)$  — интенсивность излучения;  $t_1$  и  $t_2$  — начало и конец экспозиции.

На рис. 2 приведен участок спектра поглощения  $H_2O$ , зарегистрированный при внутривибрационных измерениях, использующих весь импульс генерации и его конечную часть — примерно 20%. Как видно из рисунка, исключение из регистрации начальной части импульса генерации позволило увеличить чувствительность ВР-спектрометра примерно в 2 раза.

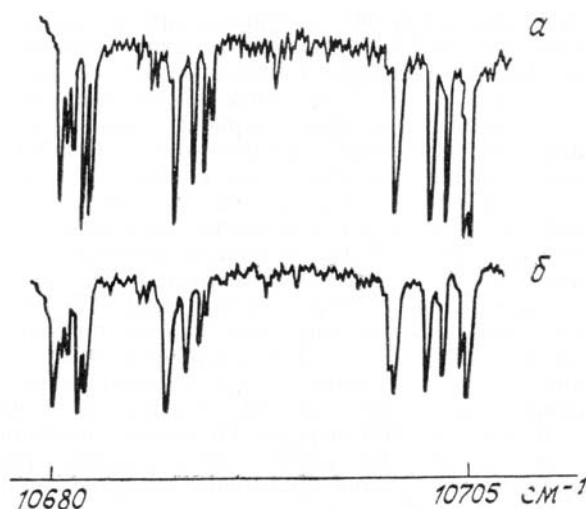


Рис. 2. Участок спектра поглощения  $H_2O$ , полученный с использованием конечной части импульса генерации (а), всего импульса генерации (б)

Чувствительность ВР-спектрометра определена по линиям  $H_2^{18}O$ , интенсивности которых измерены на фурье-спектрометре. Пороговая чувствительность ВР-спектрометра, соответствующая 10%-ному провалу в спектре генерации, равна  $8 \cdot 10^{-8} \text{ см}^{-1}$ .

### Спектр поглощения атмосферы

Спектр поглощения атмосферного воздуха ( $P = 1 \text{ атм}$ ) в области излучения  $F_2^+$ : LiF-лазера содержит около 300 линий поглощения. Денситограмма спектра поглощения атмосферы в области  $10200 - 10800 \text{ см}^{-1}$  приведена на рис. 3, положения центров линий в табл. 1. Сравнение спектра поглощения атмосферного воздуха со спектром поглощения водяного пара, также зарегистрированным на ВР-спектрометре, показывает, что поглощение атмосферы в области  $0,88 - 1,03 \text{ мкм}$  вплоть до  $K_\nu = 8 \cdot 10^{-8} \text{ см}^{-1}$  целиком определяется водяным паром. В исследуемый диапазон попадают линии полос  $2\nu_1 + \nu_3$ ,  $3\nu_3$ ,  $3\nu_1$ ,  $\nu_1 + 2\nu_3$ ,  $\nu_1 + 2\nu_2 + \nu_3$   $H_2O$ .

Интенсивности линий этих полос невелики и составляют  $10^{-6} \dots 10^{-8} \text{ см}^{-2} \text{ атм}^{-1}$ . Наиболее сильные линии группируются в диапазоне  $10340 - 10750 \text{ см}^{-1}$ , в областях  $\nu < 10200 \text{ см}^{-1}$  и  $\nu > 10800 \text{ см}^{-1}$  наблюдаются лишь отдельные слабые линии поглощения. В спектре поглощения чистых паров  $H_2O$ , определяющего, как указано выше, спектральное поглощение атмосферного воздуха, имеется большое количество близко расположенных линий, которые в ряде случаев при уширении атмосферой становятся практически неразрешенными. Поэтому в табл. 1 под одним номером иногда обозначено две линии.

В зарегистрированном спектре можно выделить микроокна прозрачности — интервалы между линиями поглощения шириной более  $5 \text{ см}^{-1}$ , внутри которых нет линий поглощения с  $K_\nu < 8 \cdot 10^8 \text{ см}^{-1}$  (см. табл. 2).

**Выводы:**

1. В лабораторных условиях зарегистрирован спектр поглощения атмосферного воздуха в области 0,88–1,03 мкм.
2. Показано, что молекулярное поглощение атмосферы в этом диапазоне определяется водяным паром вплоть до  $K_v = 8 \cdot 10^{-8} \text{ см}^{-1}$ .

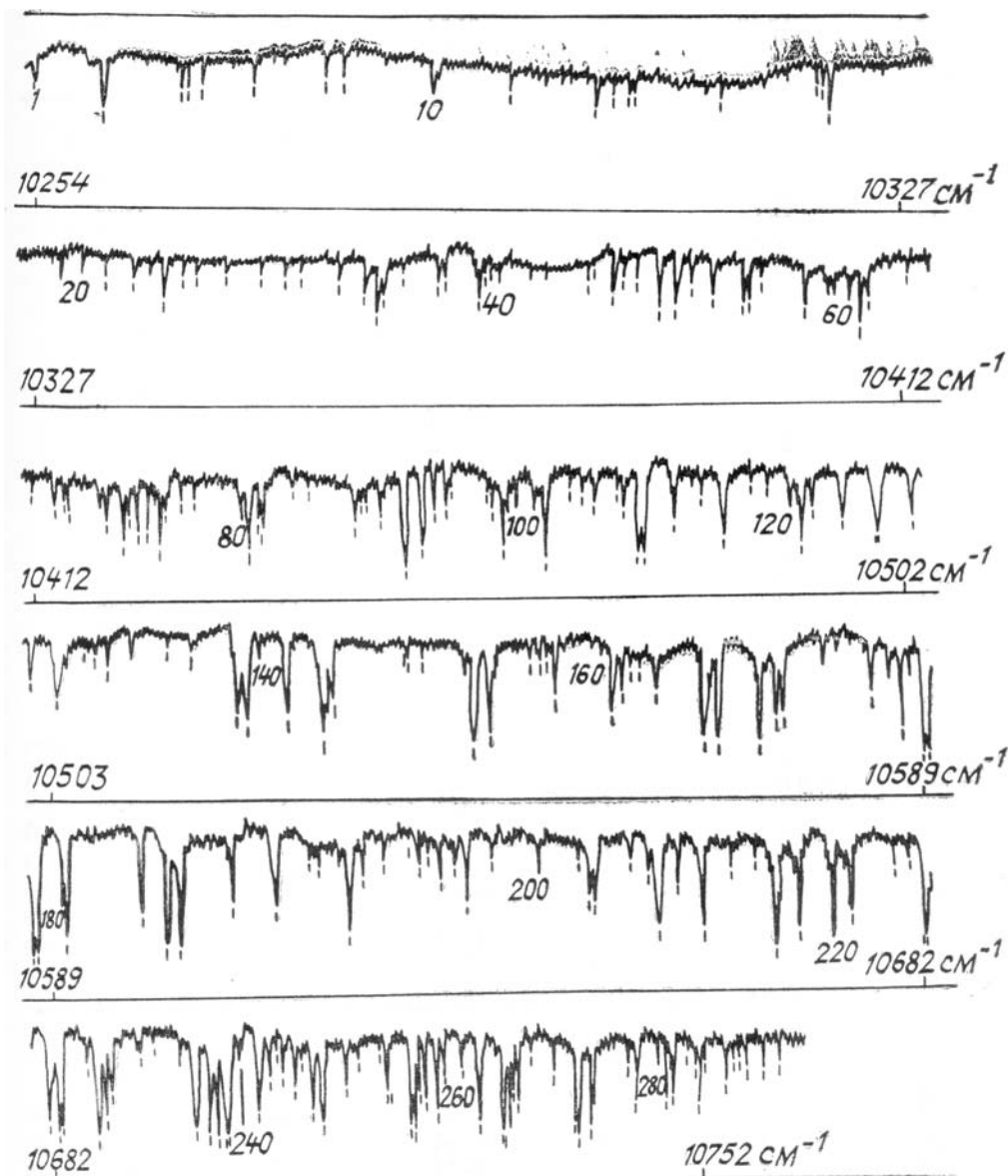


Рис. 3. Денситограмма спектра поглощения атмосферы. Нумерация линий соответствует табл. 1

Положение центров линий поглощения водяного пара, см<sup>-1</sup>

№	$\nu$ , см <sup>-1</sup>	№	$\nu$ , см <sup>-1</sup>	№	$\nu$ , см <sup>-1</sup>
1	2	3	4	5	6
1	10254,31	26	48,18	51	90,83
2	60,45	27	49,44	52	92,11
3	67,52	28	51,99	53	97,06
4	67,90	29	54,88	54	97,52
5	69,40	30	56,82	55	97,65
6	73,92	31	10357,79	56	98,61
7	74,03	32	61,31	57	10402,92
8	81,89	33	63,64	58	4,94
9	89,89	34	64,63	59	5,28
10	90,19	35	65,03	60	7,13
11	96,98	36	67,28	61	10408,20
12	10304,93	37	70,06	62	8,88
13	6,30	38	70,43	63	12,53
14	8,23	39	73,07	64	15,04
15	8,43	40	73,41	65	16,03
16	25,91	41	74,01	66	16,44
17	26,64	42	74,39	67	19,35
18	27,35	43	74,76	68	19,56
19	37,75	44	75,11	69	20,14
20	38,43	45	82,81	70	21,94
21	41,26	46	83,36	71	22,55
22	41,57	47	85,30	72	23,35
23	44,16	48	85,94	73	24,45
24	45,57	49	87,29	74	25,14
25	46,64	50	89,24	75	25,65
76	26,15	100	61,70	126	98,99
77	26,41	101	63,48	127	10502,00
78	27,79	102	64,01	128	4,11
79	29,09	103	64,59	129	4,63
80	33,55	104	67,29	130	5,40
81	34,30	105	68,40	131	7,36
82	35,35	106	69,70	132	8,15
83	35,65	107	69,87	133	9,40
84	36,29	108	72,11	134	11,48
85	38,73	109	72,89	135	14,84
86	44,96	110	74,59	136	17,13
87	45,45	111	74,98	137	21,30
88	46,04	112	77,95		21,50
89	47,54	113	78,32	138	22,36
90	47,75	114	81,16		22,74
	47,92	115	83,27	139	22,93
91	10449,96	116	83,56	140	23,69
	50,16	117	83,78	141	24,12
92	51,84	118	86,55	142	26,22
93	53,14	119	88,39	143	26,72
94	54,38	120	90,92	144	30,06
95	54,70	121	10491,45	145	30,65
96	58,64	122	91,94	147	37,29
97	59,14	123	92,97	148	37,46
98	60,29	124	95,63	149	38,87
99	60,72	125	98,71	150	42,89
151	10543,75	175	85,36	199	39,56
152	44,36	176	86,57	200	44,67
153	45,16	177	87,56	201	49,14
154	45,31	178	89,07	202	50,04
155	49,25	179	89,52	203	50,44
156	50,14	180	10592,41	204	53,94
157	50,82	181	92,82	205	55,55
158	51,20	182	10600,78	206	56,71
159	51,74	183	3,46	207	58,36
	52,12	184	5,01	208	58,54
160	56,23	185	10,67	209	10660,66
161	57,41	186	15,22	012	63,43
162	58,26		15,42	211	65,07
163	59,12	187	19,47	212	65,80
164	60,00	188	19,87	213	67,68
165	61,78	189	22,51	214	68,22
166	66,36	190	23,51	215	68,50
	66,49		23,86	216	69,45
167	66,98	191	25,10	217	70,13
168	67,86	192	27,54	218	72,45

1	2	3	4	5	6
169	72,15	193	30,25	219	73,28
170	73,85	194	31,09	220	73,50
171	74,49	195	32,36	221	74,56
172	78,72	196	33,49	222	75,16
173	80,02	197	35,19		75,31
174	83,55	198	36,44	223	79,46
224	81,90	250	13,97	276	48,53
225	82,18	251	16,63	277	48,96
226	82,79	252	17,60	278	49,31
227	83,31	253	17,80	279	51,76
228	83,63	254	20,20	280	52,03
229	86,18	255	20,55	281	52,39
230	87,31	256	21,01	282	52,95
231	88,15	257	21,80		
232	88,70	258	23,04		
233	91,70	259	23,71		
234	94,08	260	25,77		
235	95,75	261	27,71		
236	97,34	262	30,17		
237	98,92	263	30,37		
238	99,60	264	30,93		
239	10700,61	265	31,35		
240	2,64	266	32,18		
241	4,38	267	33,56		
242	5,48	268	36,15		
243	6,27	269	10738,56		
244	6,91	270	38,79		
245	8,16	271	40,28		
246	8,65	272	40,54		
247	9,86	273	44,40		
248	10,00	274	45,25		
249	11,02	275	47,51		

Таблица 2

## Микроокна прозрачности

$N$	$\Delta\nu, \text{см}^{-1}$
1	10254,4—10260,3
2	10260,5—10267,4
3	10290,3—10296,9
4	10297,1—10304,8
5	10308,5—10325,8
6	10327,5—10337,6
7	10375,2—10382,7
8	10338,3—10344,8
9	10592,9—10600,7
10	10605,1—10610,6
11	10639,7—10644,5
12	10675,4—10680,5

- Swenson J.W., Benedict W.S., Delbouille L., Roland G. The solar spectrum from  $\lambda$  7498 to  $\lambda$  12016 Å. A Table of measures and identification. Liege. 1970. 165 p.
- Mc Clatchey R.A., Benedict W.S., Clough S.A. et al. AFCRL atmospheric absorption line parameters compilation. Env. Res. Papers. Massachusetts. USA. 1973. № 434.
- Зуев В.Е., Лопасов В.П., Сеница Л.Н. // Оптика и спектроскопия. 1978. Т. 45. Вып. 3. С. 590—593.
- Гусев Ю.А., Маренников С.И., Сердюков В.И., Сеница Л.Н. // Квантовая электроника. 1982. Т. 9. № 10. С. 2105—2106.
- Баев В.М., Беликова Т.П., Коваленко С.А. и др. Спектр поглощения атмосферы в диапазоне 625—637 нм, полученный методом внутррезонаторной спектроскопии (ВРЛС). М.: ВНИИФТРИ. 1980. Вып. 41(71). С. 5—10.
- Айвазян Ю.Ж., Баев В.М., Беликова Т.П. и др. // В кн.: VI Всес. симпозиум по распространению лазерного излучения в атмосфере. Ч. 2. (Тезисы докл.). Томск. 1931. С. 39—41.

7. Баев В.М., Беликова Т.П., Ипполитов М.Б. и др. Спектр поглощения атмосферы в диапазоне 583–605 нм, полученный методом внутривибрационной лазерной спектроскопии. М., 1978. 32 с. (Препринт/ФИ АН СССР, № 31).
8. Вращкий В.А., Колеров А.Н. //ЖПС. 1984. Т. 41. № 4. С. 561–566.
9. Baev V.M., Schrader H., Toschek P.F. //Opt. Commns. 1981. V. 36. № 1. P. 57–62.

Институт оптики атмосферы  
СО АН СССР, Томск

Поступила в редакцию  
7 июня 1988 г.

**T.M. Kadoshnikova, V.I. Serdyukov, L.N. Sinitsa. Intracavity Laser Spectroscopy of the Atmosphere in the 0,88–1,03  $\mu\text{m}$  Range.**

The atmospheric absorption spectra in the 0,88–1,03  $\mu\text{m}$  range were studied by means of an intracavity  $\text{F}_2^+$ : LiF-laser spectrometer with a minimum detectable absorption coefficient of  $8 \cdot 10^{-8} \text{cm}^{-1}$  and a spectral resolution of  $0,05 \text{cm}^{-1}$ . Water vapor was found to be the major atmospheric absorber in the spectral region of interest where  $\sim 300$  absorption lines of  $\text{H}_2\text{O}$  were observed.