

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗАКИСИ АЗОТА И МЕТАНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛИНИЙ ИЗЛУЧЕНИЯ ОБЕРТОННОГО СО-ЛАЗЕРА

А. А. Ионин¹, Ю. М. Климачев¹, А. Ю. Козлов¹, А. А. Котков¹,
О. А. Романовский^{2,3*}, О. В. Харченко², С. В. Яковлев^{2,3}

УДК 621.375.826

¹ Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской АН, Москва

² Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева Сибирского отделения Российской АН,
634021, Томск, пл. Академика В. Е. Зуева, 1; e-mail: roa@iao.ru

³ Томский государственный университет, Россия

(Поступила 17 октября 2013)

Проведены лабораторные эксперименты по дистанционному зондированию метана вблизи 3.440 мкм и закиси азота вблизи 3.877 мкм с использованием линий излучения обертонового СО-лазера при реализации метода дифференциального поглощения. Представлены результаты измерений поглощения и ослабления линий излучения обертонового СО-лазера в области выбранных длин волн зондирования в смесях с исследуемыми газами при различных конфигурациях схемы проведения эксперимента.

Ключевые слова: обертоновый СО-лазер, газоанализ, атмосфера, дифференциальное поглощение.

The laboratory experiments are performed on remote sensing of methane and nitrous oxide in 3.440 and 3.877 μm spectral regions, respectively, using emission lines of the overtone CO-laser in the differential absorption implementation. Results of the measurements of absorption and attenuation of the overtone CO-laser emission lines within the selected wavelength region in mixtures of the studied gases at various configurations of the experimental scheme are presented.

Keywords: overtone CO-laser, gas analysis, atmosphere, differential absorption.

В связи с нарастающим загрязнением атмосферы большое значение приобретает оперативный контроль концентрации газовых примесей, который можно осуществить с помощью дистанционного лазерного зондирования атмосферы. Максимум информации при дистанционном определении состава атмосферы с высоким пространственно-временным разрешением можно получить лишь оптическим методом с использованием лазеров, т. е. лидаром [1]. Развитие лазерной дистанционной ИК спектроскопии требует разработки и внедрения новых лазерных источников излучения в средней ИК области спектра, способных генерировать излучение в возможно более широком диапазоне длин волн с малым шагом перестройки частоты излучения. В работах [2, 3] продемонстрировано, что линии излучения обертонового СО-лазера перспективны для дистанционного анализа малых газовых составляющих (МГС) атмосферы.

Цель данной работы — проведение модельных лабораторных экспериментов по дистанционному измерению поглощения и суммарного ослабления излучения обертонового СО-лазера в метане (CH₄) и закиси азота (N₂O) при различной конфигурации схемы зондирования с последующим восстановлением концентрации исследуемых газовых компонентов.

На выбранных с помощью разработанной методики [3] длинах волн для зондирования метана 3.440 мкм и закиси азота 3.877 мкм проведены лабораторные эксперименты по лазерному зондированию этих МГС атмосферы при реализации трассовой схемы метода дифференциального поглощения.

Первый этап экспериментов — измерение поглощения исследуемыми газами лазерного излучения (ЛИ) в поглощающей кювете с помощью калориметров OPHIR 3A-SH. Оптическая схема экспериментов по измерению поглощения излучения обертонового СО-лазера в метане и закиси азота представлена на рис. 1.

REMOTE NITROUS OXIDE AND METHANE SENSING USING EMISSION LINES OF OVERTONE CO-LASER

А. А. Ionin¹, Yu. M. Klimachev¹, A. Yu. Kozlov¹, A. A. Kotkov¹, O. A. Romanovskii^{2,3*}, O. V. Kharchenko², and S. V. Yakovlev^{2,3} (¹ P. N. Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow; ² V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1 Academician Zuev Sq., Tomsk, 634021, Russia; e-mail: roa@iao.ru; ³ Tomsk State University, Russia)

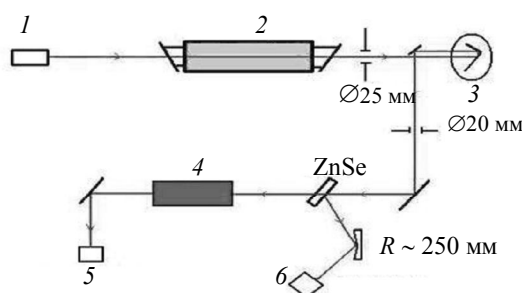


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования поглощения излучения перестраиваемого обертонового СО-лазера смесями N_2O и CH_4 с азотом: 1 — He—Ne-лазер, 2 — СО-лазер, 3 — дифракционная решетка, 4 — поглощающая кювета ($L = 61$ см), 5 и 6 — калориметры OPHIR 3A-SH

Лазерный резонатор обертонового СО-лазера 2 образован сферическим зеркалом и дифракционной решеткой 3 (420 штр/мм), работающей в режиме автоколлимации в первом порядке дифракции и выводящей излучение в нулевой порядок. Апертура лазерного пучка определяется внутрирезонаторной диафрагмой диаметром 25 мм. Для юстировки лазерного резонатора применяется He—Ne-лазер 1. Изменение спектральной линии излучения лазера осуществляется поворотом дифракционной решетки 3. Для измерения энергии лазерного импульса E_0 часть ЛИ, прошедшего диафрагму диаметром 20 мм, направляется на калориметр 6 посредством отражения от плоскопараллельной пластины из ZnSe. Калориметр 5 измеряет энергию E лазерного луча, прошедшего через поглощающую кювету 4. В кювету при давлении 1 атм напускалась смесь исследуемых газовых составляющих с азотом ($N_2O:N_2$, $CH_4:N_2$) в пропорции 1:99 при концентрации поглощающего газа 1 %. Поглощение излучения вычислено в соответствии с законом Бугера—Ламберта—Бэра. Результаты расчета и измерений на линиях поглощения N_2O и CH_4 представлены в табл. 1.

Следующий этап экспериментов — измерение поглощения и суммарного ослабления рассеянного от топографической мишени излучения, прошедшего через среду с исследуемым газом, с помощью криогенных фоторезисторов типа СВОД. Оптическая схема экспериментов по измерению коэффициента ослабления излучения обертонового СО-лазера в метане и закиси азота представлена на рис. 2.

Т а б л и ц а 1. Результаты расчета и измерений поглощения (I , отн. ед.)

$\lambda_{\text{возд}}$ мкм	Лазерный переход ($V+2 \rightarrow V$)	Расчет	Эксперимент	$\lambda_{\text{возд}}$ мкм	Лазерный переход ($V+2 \rightarrow V$)	Расчет	Эксперимент
<i>Закись азота</i>				<i>Метан</i>			
3.841	32	0.0159	—	3.320	24	0.2574	0.3093
3.852	32	0.0730	0.1456	3.324	24	0.0928	0.3372
3.877	33	0.7344	0.8362	3.332	24	0.0928	0.1378
3.887	33	0.1073	0.2242	3.340	24	0.0056	0.2104
3.892	33	0.2078	0.3197	3.349	24	0.0017	0.0374
3.897	33	0.1080	0.1144	3.440	26	0.2296	0.2077
3.907	33	0.4343	0.5639	3.444	26	0.0118	0.0712
3.918	33	0.2890	0.4703	3.448	26	0.0470	0.1554
3.930	33	0.0656	—	3.453	26	0.7120	0.7484
3.961	34	0.0163	0.0178	3.457	26	0.0021	—

В кювету при давлении 1 атм напускалась смесь исследуемых газовых составляющих с азотом ($N_2O:N_2$, $CH_4:N_2$) в пропорции 1:24 при концентрации поглощающего газа 4 %. Калориметр 4 регистрирует энергию ЛИ E_0 до прохождения луча через поглощающую кювету 5 длиной 10 см. После прохождения лазерного луча через кювету 5 часть ЛИ посредством отражения от плоскопараллельной пластины из CaF_2 направляется на калориметр 6, который измеряет энергию лазерного луча E , прошедшего через поглощающую кювету. Поглощение ЛИ рассчитано в соответствии с законом Бугера—Ламберта—Бэра. Другая часть ЛИ направлялась на топочель 7, расположенную за пластиной CaF_2 . В качестве топочели использован диффузно рассеивающий отражатель с альбедо 0.8. Фоторезистором СВОД 8 регистрировались энергия ЛИ, прошедшего через среду с исследуемым газом, и потерявшаяся часть ЛИ при отражении от топочели. Результаты расчета и измерений ослабления для закиси азота и метана представлены в табл. 2.

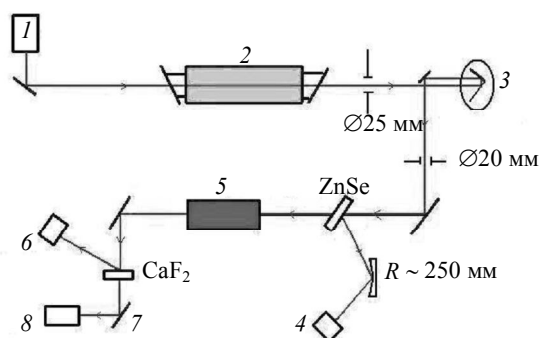


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для измерения ослабления рассеянного от топографической мишени излучения, прошедшего через среду с исследуемым газом: 1 — He—Ne-лазер, 2 — СО-лазер, 3 — дифракционная решетка, 4 — калориметр OPHIR 3A-SH, 5 — поглощающая кювета ($L = 10$ см), 6 — калориметр (OPHIR 3A-SH)/ИКС (ИК-спектрометр), 7 — топоцель, 8 — фоторезистор СВОД

Т а б л и ц а 2. Рассчитанные и измеренные коэффициенты поглощения (α , см^{-1}) и ослабления (μ , см^{-1})

$\lambda_{\text{возд}}$, мкм	Лазерный переход ($V+2 \rightarrow V$)	$\alpha_{\text{расч}}$	$\alpha_{\text{эксп}}$	$\mu_{\text{эксп}}$	$\lambda_{\text{возд}}$, мкм	Лазерный переход ($V+2 \rightarrow V$)	$\alpha_{\text{расч}}$	$\alpha_{\text{эксп}}$	$\mu_{\text{эксп}}$
<i>Закись азота</i>					<i>Метан</i>				
3.841	32	0.0014	0.0095	—	3.328	24	0.0025	—	0.0090
3.852	32	0.0067	0.0004	0.0129	3.336	24	0.0005	0.00462	0.0151
3.877	33	0.1178	0.0953	0.1202	3.345	24	0.0381	0.0199	0.0276
3.892	33	0.0209	0.0502	—	3.432	26	0.0003	0.0029	—
3.897	33	0.0102	0.0072	—	3.440	26	0.0247	0.0078	0.0564
3.907	33	0.0508	0.0262	0.0029	3.444	26	0.0011	—	0.0563
3.918	33	0.0307	0.0223	0.0066	3.453	26	0.1159	0.1040	0.1733
3.930	33	0.0061	0.0014	0.0185					

Из данных по измерению поглощения (табл. 1) видно, что экспериментальные и рассчитанные значения согласуются во всем спектральном интервале измерений, кроме нескольких неинформативных линий излучения в области полосы поглощения метана, где возможно влияние остаточного мешающего поглощения водяного пара в измерительной кювете. Необходимо также учитывать погрешность измерения энергии излучения калориметром OPHIR 3A-SH, которая не превышает 5 %.

Из приведенных в табл. 2 экспериментальных данных по измерению коэффициентов поглощения и ослабления видно, что измеренные (поглощение и ослабление) и рассчитанные (поглощение) значения находятся в удовлетворительном согласии во всем спектральном интервале, в котором проведены измерения. Некоторые расхождения расчета и измерений коэффициентов поглощения метана также можно объяснить влиянием остаточного мешающего поглощения водяного пара в измерительной кювете либо неоднородностью рассеянного от топоцели ЛИ, прошедшего через среду с исследуемой смесью газов.

Для выбранных при работе по топоцели длин волн зондирования метана и закиси азота решена обратная задача восстановления концентраций данных МГС в поглощающей кювете длиной 10 см с помощью оберточного СО-лазера при анализе экспериментально полученных коэффициентов поглощения. Результаты восстановления концентрации и теоретические данные приведены в табл. 3 и на рис. 3. Видно, что на решение обратной задачи восстановления концентраций большое влияние оказывает точность измерения коэффициентов поглощения исследуемых газовых компонентов.

Т а б л и ц а 3. Обратная задача восстановления концентраций (C , %) закиси азота и метана

Газ	λ , мкм	$E_{\text{изл}}$, мДж	$\alpha_{\text{расч}}$, см^{-1}	$\alpha_{\text{эксп}}$, см^{-1}	C^*	$C_{\text{эксп}}$	ΔC , %
Метан	3.440	17.2	0.0247	0.0078	4	5.1	28
Закись азота	3.877	1.97	0.1178	0.0953	4	4.2	5

Пр и м е ч а н и е. C^* — концентрация газа в калибровочной смеси.

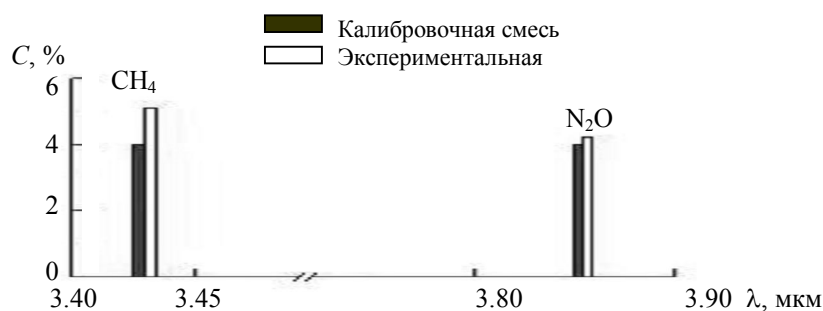


Рис. 3. Восстановление концентраций закиси азота и метана при работе на выбранных длинах волн зондирования излучением обертонового СО-лазера

Проведенные на основе численного моделирования тестовые лабораторные эксперименты по измерению поглощения и ослабления линий излучения обертонового СО-лазера в смесях с исследуемыми газами дают приемлемое соответствие рассчитанных значений с измеренными, кроме нескольких неинформативных длин волн, что позволяет применять разработанную методику поиска длин волн при реализации метода дифференциального поглощения. Достоверность полученных результатов подтверждается решением обратной задачи по восстановлению концентраций исследуемых газовых компонентов при анализе полученных в ходе выполнения эксперимента коэффициентов поглощения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 13-05-98074 - р_сибирь-а) и гранта Президента РФ по поддержке ведущих научных школ НШ-4714.2014.5.

[1] Р. М. Межерис. Лазерное зондирование атмосферы, Москва, Мир (1987)

[2] А. А. Ионин, Ю. М. Климачев, А. Ю. Козлов, А. А. Котков, О. А. Романовский, Л. В. Селезнев, Д. В. Сеницын, О. В. Харченко, А. В. Шелестович, С. В. Яковлев. Изв. вузов. Сер. физ., **51**, № 11 (2008) 76—84

[3] О. А. Романовский, О. В. Харченко, С. В. Яковлев. Журн. прикл. спектр., **79**, № 5 (2012) 799—805