

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 621.375.826

**Измерение поглощения в закиси азота и метане
на длинах волн излучения обертонового СО-лазера
с использованием топографической мишени
и приемного телескопа**

**А.А. Ионин¹, Л.Ю. Кальницкий², И.О. Киняевский¹, Ю.М. Климачев¹,
А.Ю. Козлов¹, А.А. Котков¹, Г.Г. Матвиенко^{3,4},
О.А. Романовский^{3,4}, С.В. Яковлев^{3,4*}**

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН
119991, г. Москва, Ленинский пр., 53

²Московский физико-технический институт (государственный университет)
141700, г. Долгопрудный Московской обл., Институтский пер., 9

³Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

⁴Национальный исследовательский Томский государственный университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 20.01.2016 г.

Проведены лабораторные эксперименты с обертоновым СО-лазером по моделированию лидарной системы. Реализована трассовая схема зондирования газовых компонент атмосферы — закиси азота и метана — на линиях излучения импульсного обертонового СО-лазера с использованием топографической мишени и приемного телескопа. Представлены результаты измерения поглощения излучения обертонового СО-лазера, действующего на 20 выбранных линиях зондирования, в смесях с исследуемыми газами при различных конфигурациях схемы проведения экспериментов.

Ключевые слова: обертоновый СО-лазер, газовый анализ, атмосфера, дифференциальное поглощение; first-overtone CO laser, gas analysis, atmosphere, differential absorption.

Введение

Одна из основных современных глобальных проблем — это возможное изменение климата и окружающей среды под воздействием антропогенных факторов. Для надежной оценки этих изменений необходимо развитие новых методов и технологий исследования газового состава атмосферы, при этом наиболее интенсивно в последнее время развиваются дистанционные методы, которые, в отличие от стандартных контактных методов газового анализа, обеспечивают возможность получения данных с высокой оперативностью и в значительных пространственных

масштабах. Указанным требованиям в наибольшей степени удовлетворяют лазерные методы исследования газового состава атмосферы, в частности метод дифференциального поглощения, основанный на использовании резонансного поглощения, которое обладает максимальным сечением взаимодействия лазерного излучения с атмосферными газами, что и определяет его высокую чувствительность [1].

Спектральный диапазон длин волн 2,5–4,2 мкм является одним из наиболее информативных для лазерного зондирования как основных малых газовых составляющих атмосферы (H₂O, CO₂, CH₄, NO₂, NO и др.), так и газовых компонент, представляющих собой сильные загрязнители, токсины, взрывчатые или наркотические вещества. Электроразрядный СО-лазер способен эффективно действовать на множестве (~ 1000) колебательно-вращательных переходов, как в основной колебательной полосе (на переходах $V + 1 \rightarrow V$, где V — номер колебательного уровня) с длиной волны излучения от ~ 4,9 до 8,2 мкм [2], так и в полосе первого колебательного обертона (на переходах $V + 2 \rightarrow V$) с длиной волны от ~ 2,5 до 4,2 мкм [3–5]. Для этих же целей можно было бы

* Андрей Алексеевич Ионин (aion@sci.lebedev.ru); Леонид Юрьевич Кальницкий (leoni.yurevic@gmail.com); Игорь Олегович Киняевский (kigor@sci.lebedev.ru); Юрий Михайлович Климачев (umk@sci.lebedev.ru); Андрей Юрьевич Козлов (akozlov@sci.lebedev.ru); Андрей Александрович Котков (aakche@sci.lebedev.ru); Геннадий Григорьевич Матвиенко (mgg@iao.ru); Олег Анатольевич Романовский (roa@iao.ru); Семён Владимирович Яковлев (ysv@iao.ru).

использовать химические HF- или DF-лазеры [6, 7], спектры генерации которых находятся в интервале 2,7–4,5 мкм, однако сами HF- или DF-лазеры работают на достаточно токсичных активных средах. А главное, количество линий генерации СО-лазера во много раз превосходит число линий генерации HF- и DF-лазеров вместе взятых, что обеспечивает гораздо больше совпадений длин волн лазерного излучения и линий поглощения зондируемых газов. В наших работах [8, 9] были проведены первые тестовые эксперименты по измерению поглощения излучения оберточного СО-лазера в газовой кювете с использованием топографической мишени.

В данной работе для моделирования лидарной системы в лаборатории газовых лазеров ФИАН была реализована трассовая схема зондирования газовых компонент атмосферы на линиях излучения импульсного электроионизационного (ЭИ) оберточного СО-лазера с использованием топографической мишени и приемного телескопа, предоставленного ИОА СО РАН. На оптической трассе до мишени помещалась кювета с калиброванной смесью, содержащей поглощающий газ – метан или закись азота, для определения точности измерений поглощения при использовании различных методик обработки результатов.

Экспериментальная установка и методика измерений

Эксперименты по трассовому измерению поглощения излучения оберточного СО-лазера проводились с применением импульсной ЭИ СО-лазерной установки, которая подробно описана в работе [10]. В этих экспериментах для рассеяния излучения в качестве топографической мишени (топомишени) использовалась внутренняя стена лаборатории. Для регистрации рассеянного от топомишени сигнала использовались две оптические схемы: в первом случае сигнал рассеянного излучения собирался телескопом на фотодетектор, а во втором случае сигнал отраженного излучения – на калориметр.

Типичная временная форма импульса излучения оберточного СО-лазера представлена на рис. 1. Сигнал 2 идет с фотодетектора ФСГ-22, измеряющего излучение непосредственно из лазера, настроенного на длину волны линии 27 → 25P(11). Сигнал 1 идет с фотодетектора PDA20H-EC, измеряющего излучение лазера через монохроматор, настроенный на длину волны соседней линии 27 → 25P(10), т.е. на ней паразитной генерации излучения не наблюдается. Длительность импульса лазерного излучения по уровню 0,1 от максимума равнялась ~ 0,6 мс (временной масштаб на рис. 1 – 250 мкс/клетку). Временная задержка начала импульса лазерного излучения по отношению к началу импульса накачки рабочей лазерной смеси (момент $t = 0$, соответствующий концу первой клетки, на рис. 1) составляла ~ 0,14 мс. Повторение импульсов лазерного излучения происходило через 1–3 мин.

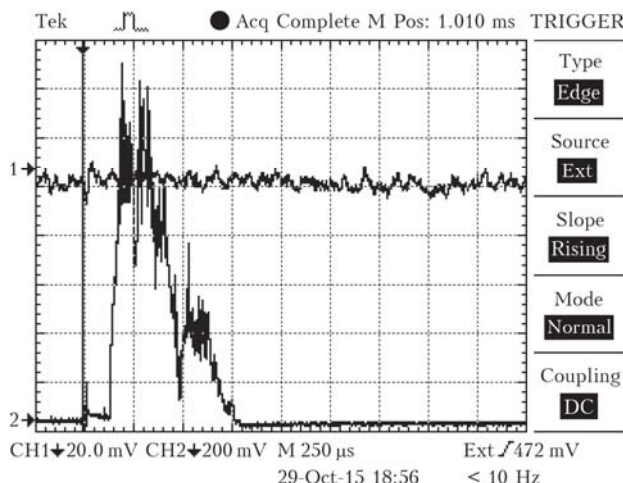


Рис. 1. Временная динамика импульса лазерного излучения на линии 27 → 25P(11)

Пример временной формы импульсов излучения оберточного СО-лазера для разных переходов, представлен на рис. 2 (дв. вкладка). Пиковая мощность лазерного излучения $P(t)$ рассчитывалась на основе анализа временной динамики излучения $U(t)$, зарегистрированной с помощью фотодетектора, и с учетом измеренной энергии импульсов излучения E по формуле

$$P(t) = \frac{U(t)E}{\int U(t)dt} \quad (1)$$

Форма импульса не всегда повторялась, а начальная часть импульса не всегда имела максимальную амплитуду. Близкими по форме были импульсы излучения на переходах, принадлежащих одной колебательной полосе (см. рис. 2, б), хотя энергия импульсов излучения могла отличаться в два раза.

Измерения поглощения проводились на 20 линиях излучения оберточного СО-лазера, представленных в таблице. Линии излучения СО-лазера выбирались таким образом, чтобы поглощение на этих

Энергия импульсов излучения E на лазерных линиях, использовавшихся в экспериментах

ν , см ⁻¹	λ , мкм	Линия	E , мДж
1	2	3	4
2954,58	3,38365	27 → 25P(9)	38,7
2947,33	3,39198	27 → 25P(11)	65,0
2905,92	3,44031	28 → 26P(9)	49,9
2895,04	3,45324	28 → 26P(12)	80,0
2891,27	3,45774	28 → 26P(13)	61,2
2853,86	3,50306	29 → 27P(10)	68,6
2850,27	3,50748	29 → 27P(11)	50,4
2746,45	3,64007	31 → 29P(13)	108,6
2742,72	3,64501	31 → 29P(14)	90,2
2657,55	3,76183	33 → 31P(11)	112,0
2577,96	3,87798	35 → 33P(6)	6,9
2574,85	3,88267	35 → 33P(7)	21,3
2571,67	3,88747	35 → 33P(8)	34,1
2568,42	3,89239	35 → 33P(9)	56,2

Окончание таблицы

1	2	3	4
2565,10	3,89742	35 → 33P(10)	65,00
2561,71	3,90258	35 → 33P(11)	71,00
2558,25	3,90786	35 → 33P(12)	86,80
2554,72	3,91325	35 → 33P(13)	72,20
2551,13	3,91877	35 → 33P(14)	65,00
2547,46	3,92440	35 → 33P(15)	45,12

Примечание. ν – волновое число; λ – длина волны в воздухе.

длинах волн в парах воды было минимальным. Коэффициенты поглощения лазерного излучения парами воды рассчитывались с использованием базы данных HITRAN.

В экспериментах по моделированию лидарного зондирования для приема сигнала рассеянного излучения использовался телескоп, спроектированный по схеме Кассегрена, собирающий рассеянное излучение от тополишени на фотодетектор. Оптическая схема экспериментов представлена на рис. 3. Газовая смесь напускалась в газовую кювету 1 длиной

$L = 0,145$ м. Импульсная ЭИ СО-лазерная установка 2 действовала в частотно-селективном режиме на обертоновых колебательных переходах молекулы СО. Лазерный резонатор длиной 4 м был образован сферическим зеркалом 3 (радиус кривизны 20 м) и отражательной дифракционной решеткой (ДР) 4 (420 штр./мм, угол блеска 27°). Решетка действовала в автоколлимационном режиме, поскольку устанавливалась под таким углом, чтобы излучение на выбранной лазерной линии при отражении от решетки в первый порядок дифракции возвращалось в лазерный резонатор. Излучение из резонатора выводилось при отражении лазерного излучения в нулевой порядок дифракции. Перестройка частоты излучения СО-лазера по лазерным линиям осуществлялась поворотом ДР. Чтобы направление вывода лазерного излучения не менялось при повороте решетки, вместе с решеткой поворачивалось плоское зеркало 5, закрепленное на том же поворотном столике. Угол поворота решетки контролировался с помощью вспомогательного полупроводникового лазера 6 (ЛЦ-1, длина волны излучения 0,65 мкм), излучение которого направлялось на шкалу 7.

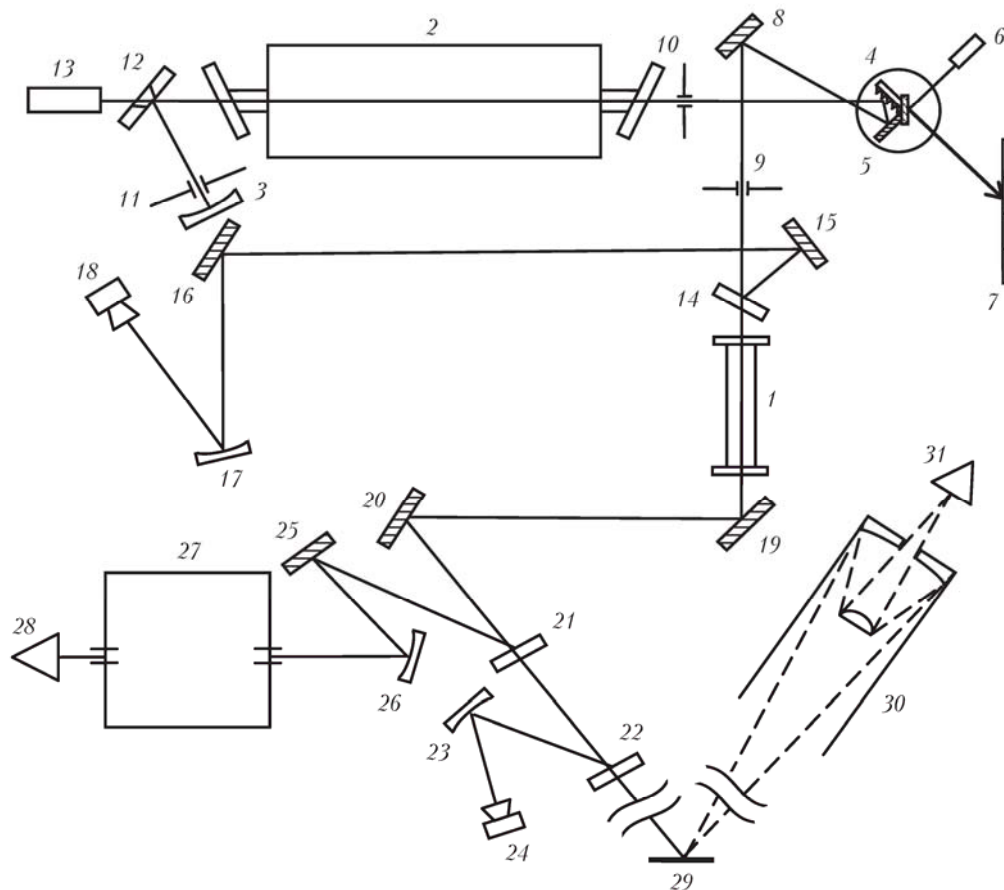


Рис. 3. Оптическая схема для измерения поглощения излучения обертонового СО-лазера в газовой кювете при рассеянии от тополишени с телескопом: 1 – газовая кювета; 2 – импульсная ЭИ СО-лазерная установка; 3 – сферическое зеркало с радиусом кривизны 20 м; 4 – дифракционная решетка; 5, 8, 15, 16, 19, 20, 25 – плоские поворотные зеркала; 6 – полупроводниковый лазер ($\lambda \sim 0,65$ мкм); 7 – шкала углов поворота; 9, 10, 11 – диафрагмы диаметром 19, 28 и 35 мм соответственно; 12 – зеркало с отверстием; 13 – He-Ne-лазер; 14, 21, 22 – плоскопараллельные пластины из CaF_2 ; 18, 24 – calorimeters OPHIR 3A-SH; 17, 23, 26 – сферические зеркала с радиусом кривизны 1 м; 27 – монохроматор; 28 – фотодетектор PDA20H-EC; 29 – тополишень; 30 – приемный телескоп; 31 – фотодетектор J15D22

После отражения от дифракционной решетки луч выходного излучения направлялся с помощью поворотного зеркала 8 в газовую кювету, проходя при этом через диафрагму 9 диаметром 19 мм для согласования размера светового пучка и апертуры кюветы. До прохождения через газовую кювету часть излучения (~ 5%) отводилась пластиной 14 из CaF₂ с помощью поворотных зеркал 15 и 16 на калориметр OPHIR 3A-SH 18, который находился на расстоянии 9,2 м от пластины 14. Для обеспечения попадания всего пучка на приемную площадку калориметра световой поток фокусировался с помощью сферического зеркала 17 с радиусом кривизны 1 м. Аналогичным образом с помощью пластины 22, сферического зеркала 23 и калориметра 24 измерялась энергия излучения на выходе из газовой кюветы. Кроме того, часть излучения пластиной 21 из CaF₂, с помощью плоского 25 и сферического 26 зеркал направлялась на вход монохроматора ИКС-31 27, после выхода из которого излучение регистрировалось фотодетектором PDA20H-EC 28. Прошедшее через две пластины 21 и 22 излучение рассеивалось на тополишени 29, после чего частично собиралось приемным телескопом 30 на фотодетектор 31 Teledyne Judson Technologies J15D22. В качестве тополишени использовалась внутренняя стена лаборатории.

В первой серии экспериментов расстояние от пластины 14 до тополишени L_{T1} равнялось 24,1 м, а расстояние от тополишени до фотодетектора 28 L_{T2} (с учетом длины телескопа) — 19,1 м. Во второй серии экспериментов длина трассы была увеличена примерно на 20 м ($L_{T1} = 45,8$ м; $L_{T2} = 41,0$ м).

Для каждой линии лазерного излучения и каждого образца поглощающей смеси было сделано по несколько измерений энергии прошедшего через поглощающую кювету лазерного излучения и формы сигнала рассеянного излучения. После чего вычислялся коэффициент поглощения α излучения обертонного СО-лазера газовой смесью в соответствии с законом Бугера—Ламберта—Бера:

$$\alpha = -\frac{1}{L} \ln \left(\frac{\langle A/E_0 \rangle}{\langle A^{\text{II}}/E_0^{\text{II}} \rangle} \right), \quad (2)$$

где L — длина газовой кюветы; E_0 и E_0^{II} — энергия импульса излучения лазера при измерении поглощения (E_0) и с пустой кюветой (E_0^{II}). Поскольку энергия лазерных импульсов варьировалась в зависимости от условий накачки активной среды, то измерение энергии импульса до попадания излучения в кювету было необходимо для калибровки измерений. В качестве экспериментальных значений A (с наполненной кюветой) и A^{II} (с пустой кюветой), необходимых для расчета поглощения, использовались три измеряемые величины:

- энергия импульса излучения, прошедшего через газовую кювету;
- амплитуда сигнала рассеянного от тополишени излучения;
- интеграл сигнала рассеянного от тополишени излучения.

Измерение энергии прошедшего излучения использовалось для калибровки системы измерения

и проверки достоверности проведенных расчетов поглощения в кювете на выбранных лазерных линиях (расчеты проводились с использованием базы данных HITRAN). Измерение амплитуды и интеграла сигнала рассеянного излучения использовались для моделирования лидарных измерений с целью определения наилучшей методики измерений. На каждой линии лазерного излучения и для каждой поглощающей смеси газов было проведено несколько измерений (минимум три), а при определении измеренных значений коэффициентов поглощения использовались средние значения соотношений A/E_0 и $A^{\text{II}}/E_0^{\text{II}}$ для каждого набора экспериментальных условий.

В первой серии экспериментов ($L_{T1} = 24,1$ м, $L_{T2} = 19,1$ м) были измерены коэффициенты поглощения излучения обертонного СО-лазера в смесях газов N₂O:N₂ = 1:49 (рис. 4, цв. вкладка), N₂O:N₂ = 1:24 (рис. 5, цв. вкладка), CH₄:N₂ = 1:49 (рис. 6, цв. вкладка), CH₄:N₂ = 1:24 (рис. 7, цв. вкладка) и CH₄:N₂ = 1:12 (рис. 8, цв. вкладка) при давлении 1 атм. На данных рисунках представлены коэффициенты поглощения, которые были измерены по энергии (синий цвет) прошедшего излучения, по амплитуде (черный) и интегралу (зеленый) сигнала рассеянного излучения, и проведено сравнение полученных результатов с расчетами с использованием базы данных HITRAN (красный). Обращаем внимание на то, что отрицательные значения коэффициентов поглощения, указанные на рис. 6–8, характеризуют погрешность измерений на конкретных спектральных линиях по той или иной методике, поскольку никакого усиления излучения в наших экспериментах не должно быть.

Наибольшие погрешности измерений, как и ожидалось, наблюдались при сравнении амплитуд сигналов рассеянного излучения, поскольку все полученные в экспериментах величины калибровались по измерениям энергии лазерного излучения, которая является характеристикой полного импульса излучения, а амплитуда сигнала — характеристикой отдельного временного интервала внутри импульса излучения. При этом наибольшие погрешности данных величин наблюдаются на линиях 33–31P(11) и 35–33P(6, 7, 8). Остальные измеренные коэффициенты поглощения (по значениям энергии лазерного импульса после поглощающей кюветы и интегралу формы сигнала рассеянного излучения) демонстрируют хорошее согласие с рассчитанными значениями.

Аналогичные эксперименты были проведены при увеличенном расстоянии до тополишени ($L_{T1} = 45,8$ м; $L_{T2} = 41,0$ м). Использовалась поглощающая кювета длиной 0,145 м со смесью CH₄:N₂ = 1:49 при давлении 1 атм. Результаты этих экспериментов и их сравнение с расчетами по базе данных HITRAN представлены на рис. 9 (цв. вкладка).

В последней серии экспериментов фотодетектор после телескопа был заменен калориметром OPHIR 3A-SH для непосредственного измерения энергии рассеянного излучения, собранного телескопом, а тополишень была заменена отражающим назад зеркалом. Также использовалась поглощающая кювета длиной 0,145 м со смесью CH₄:N₂ = 1:49 при давлении 1 атм. Результаты этих экспериментов и их

сравнение с расчетами по базе данных HITRAN представлены на рис. 10 (цв. вкладка).

Экспериментальные данные, полученные в последней серии экспериментов, можно использовать для определения концентрации метана в атмосфере по методу дифференциального поглощения, поскольку измерения поглощения проводились как на линиях излучения оберточного СО-лазера с заметным поглощением метаном, так и на близко к ним расположенных линиях, которые в метане практически не поглощаются. Причем лазерные линии были выбраны в том спектральном диапазоне, в котором отсутствует поглощение в парах воды и в углекислом газе.

Заключение

Проведены измерения поглощения излучения оберточного СО-лазера, действующего на 20 выбранных спектральных линиях, в газовой кювете, содержащей исследуемые газы при различных парциальных давлениях с добавлением до атмосферного давления буферного газа, с использованием топографической мишени и приемного телескопа.

Измеренные коэффициенты поглощения (по значениям энергии лазерного импульса после поглощающей кюветы и интегралу формы сигнала рассеянного излучения) демонстрируют хорошее согласие с рассчитанными по базе данных HITRAN значениями коэффициентов поглощения. Наибольшие погрешности измерений, как и ожидалось, наблюдались при сравнении амплитуд сигналов рассеянного излучения, поскольку все полученные в экспериментах величины калибровались по измерениям энергии лазерного излучения, которая является характеристикой полного импульса излучения, а амплитуда сигнала — характеристикой отдельного временного интервала внутри импульса излучения.

Представленные в данной работе эксперименты по поглощению излучения оберточного СО-лазера проводились на уникальной импульсной СО-лазерной установке, которая велика для мобильных лидаров. В настоящее время в лаборатории газовых лазеров ФИАН разработан более компактный и, соответственно, более технологичный щелевой СО-лазер с высокочастотной накачкой, который способен генерировать излучение в полосе первого колебательного обертона молекулы СО [11] и может быть использован в дальнейшем для лидарных исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 13-05-98074) и УНК ФИАН.

A.A. Ionin, L.Yu. Kalnitskii, I.O. Kinyavskii, Yu.M. Klimachev, A.Yu. Kozlov, A.A. Kotkov, G.G. Matvienko, O.A. Romanovskii, S.V. Yakovlev. Measuring the absorption in nitrous oxide and methane at first-overtone CO laser wavelengths using topographic target and receiving telescope.

Laboratory experiments with a first-overtone CO laser are performed to simulate a lidar system. The trace remote sensing scheme of atmospheric gases (nitrous oxide and methane) at emission lines of the pulsed first-overtone CO laser is tested using topographic target and receiving telescope. Results of the measurements of absorption of the first-overtone CO laser operating at 20 selected emission lines in gas mixtures with the gases studied at various configurations of the experimental scheme are presented.

1. *Агишев Р.Р.* Лидарный мониторинг атмосферы. М.: Физматлит, 2009. 316 с.
2. *Ионин А.А.* Лазеры на окиси углерода с накачкой электрическим разрядом // Энциклопедия низкотемпературной плазмы / Под ред. С.И. Яковленко. Сер. Б. Т. XI-4. М.: Физматлит, 2005. С. 740–752.
3. *Басов Н.Г., Ионин А.А., Котков А.А., Курносков А.К., Маккорд Д.Е., Напартович А.П., Селезнев Л.В., Туркин Н.Г., Хагер Г.Д.* Импульсный лазер на первом колебательном оберitone молекулы СО, действующий в спектральном диапазоне 2,5–4,2 мкм. 1. Многочастотный режим генерации // Квант. электрон. 2000. Т. 30, № 9. С. 771–782.
4. *Басов Н.Г., Ионин А.А., Котков А.А., Курносков А.К., Маккорд Д.Е., Напартович А.П., Селезнев Л.В., Туркин Н.Г., Хагер Г.Д.* Импульсный лазер на первом колебательном оберitone молекулы СО, действующий в спектральном диапазоне 2,5–4,2 мкм. 2. Частотно-селективный режим // Квант. электрон. 2000. Т. 30, № 10. С. 859–872.
5. *Ionin A.A., Kurnosov A.K., Napartovich A.P., Seleznev L.V.* Lasers on overtone transitions of carbon monoxide molecule // Laser Phys. 2010. V. 20, N 1. P. 144–186.
6. *Agroskin V.Ya., Bravy B.G., Kirianov V.I., Papin V.G., Vasiliev G.K.* Mobil pulsed chain HF/DF laser: Prospects for remote analysis of atmosphere // Proc. Int. Conf. LASERS'98. 7–11 Dec, 1998, Tucson, AZ, USA, Ed. by V. Corcoran, T. Goldman. McLean, VA, USA: STS Press, 1999. P. 469.
7. *Матвиенко Г.Г., Шаманаев В.С., Романовский О.А., Харченко О.В., Пташник И.В.* Применимость DF-лазера для детектирования аэрозоль-газовых выбросов // Прикл. физ. 2002. № 1. С. 129–138.
8. *Ионин А.А., Климачев Ю.М., Козлов А.Ю., Котков А.А., Матвиенко Г.Г., Романовский О.А., Харченко О.В., Яковлев С.В.* Возможности применения оберточного СО-лазера для дистанционного газоанализа атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 8. С. 702–707; *Ionin A.A., Klimachev Yu.M., Kozlov A.Yu., Kotkov A.A., Matvienko G.G., Romanovskii O.A., Kharchenko O.V., Yakovlev S.V.* Application of an overtone CO laser for remote gas analysis of the atmosphere // Atmos. Ocean. Opt. 2013. V. 26, N 1. P. 68–73.
9. *Ионин А.А., Климачев Ю.М., Козлов А.Ю., Котков А.А., Романовский О.А., Харченко О.В., Яковлев С.В.* Дистанционное зондирование закиси азота и метана с использованием линий излучения оберточного СО-лазера // Ж. прикл. спектроскопии. 2014. Т. 81, № 2. С. 313–316.
10. *Vetoshkin S.V., Ionin A.A., Klimachev Yu.M., Kozlov A.Yu., Kotkov A.A., Rulev O.A., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V.* Multiline laser probing for active media CO:He, CO:N₂, and CO:O₂ in wide-aperture pulsed amplifier // J. Russian Laser Research. 2006. V. 27, N 1. P. 33–69.
11. *Ionin A., Kozlov A., Seleznev L., Sinitsyn D.* Slab RF discharge overtone CO laser. ICONO/LAT 2010. Aug. 23–26, 2010. Kazan. Russia // Proc. SPIE. 2011. V. 7994. P. 79941N.

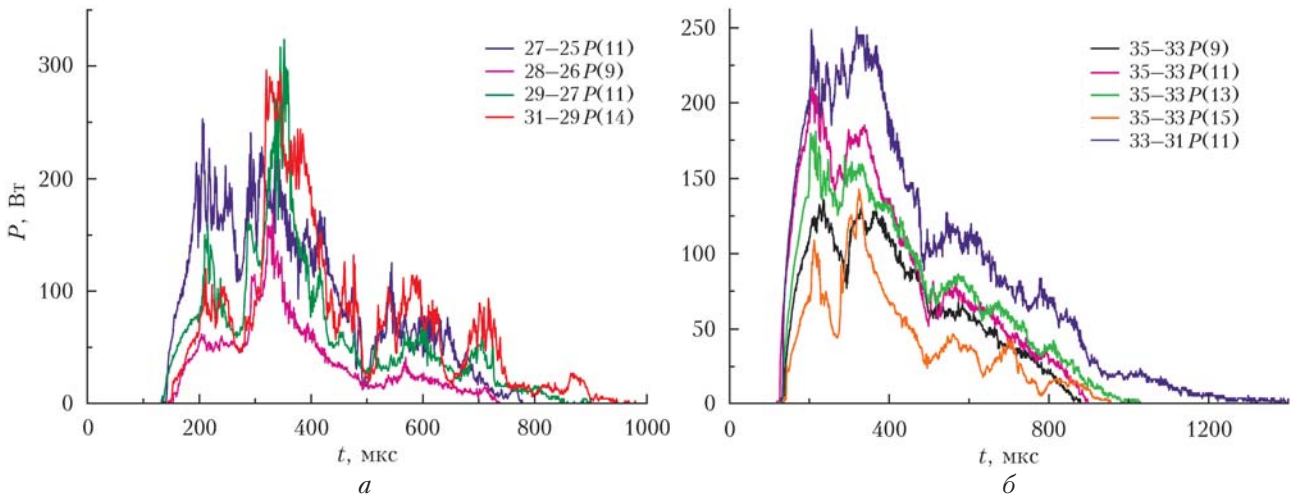


Рис. 2. Временная форма импульсов излучения оберточного СО-лазера для нескольких переходов: *a* – переходы, использованные для измерения поглощения в метане; *б* – переходы, использованные для измерения поглощения в закиси азота

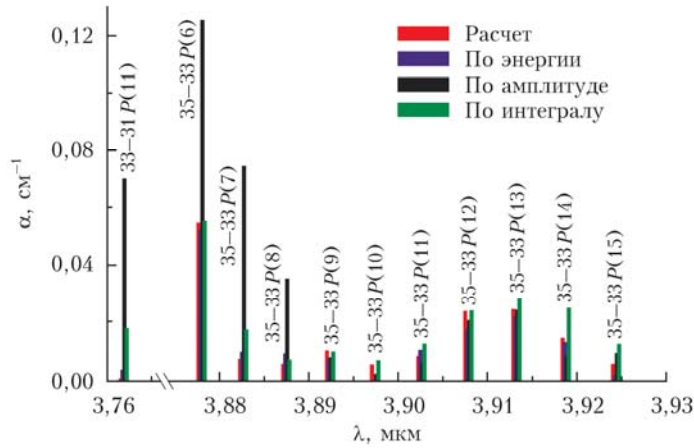


Рис. 4. Рассчитанные по базе данных HITRAN и измеренные тремя методами коэффициенты поглощения излучения оберточного СО-лазера в газовой смеси $N_2O:N_2 = 1:49$ при давлении 1 атм

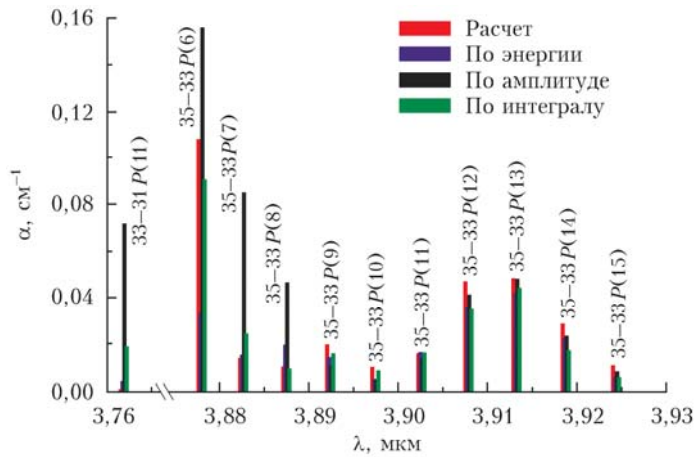


Рис. 5. Рассчитанные по базе данных HITRAN и измеренные тремя методами коэффициенты поглощения излучения оберточного СО-лазера в газовой смеси $N_2O:N_2 = 1:24$ при давлении 1 атм

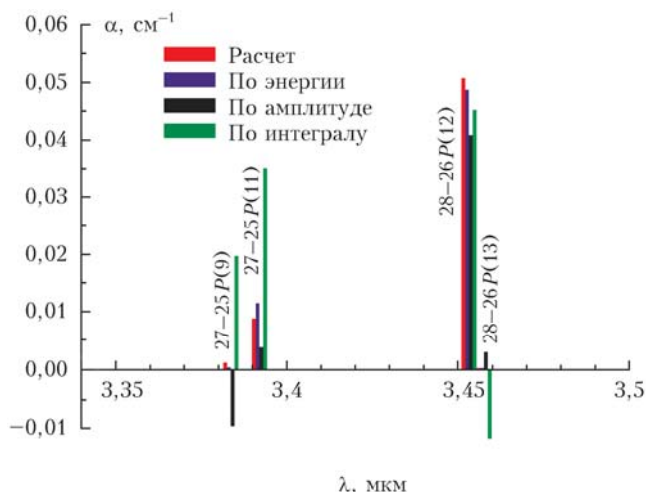


Рис. 6. Рассчитанные по базе данных HITRAN и измеренные тремя методами коэффициенты поглощения излучения оберточного СО-лазера в газовой смеси $\text{CH}_4:\text{N}_2 = 1:49$ при давлении 1 атм

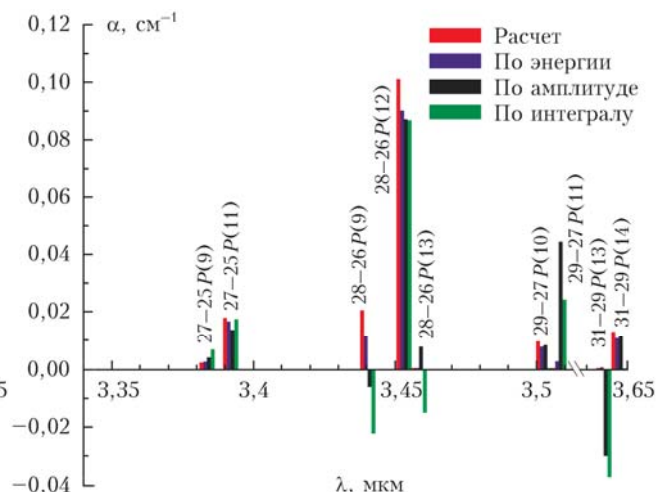


Рис. 7. Рассчитанные по базе данных HITRAN и измеренные тремя методами коэффициенты поглощения излучения оберточного СО-лазера в газовой смеси $\text{CH}_4:\text{N}_2 = 1:24$ при давлении 1 атм

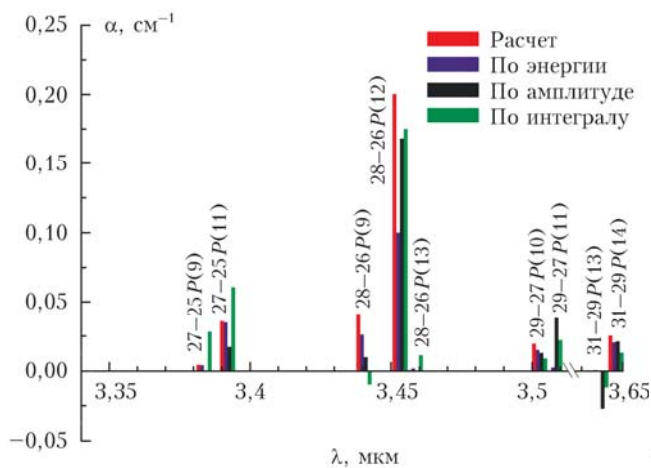


Рис. 8. Рассчитанные по базе данных HITRAN и измеренные тремя методами коэффициенты поглощения излучения оберточного СО-лазера в газовой смеси $\text{CH}_4:\text{N}_2 = 1:12$ при давлении 1 атм

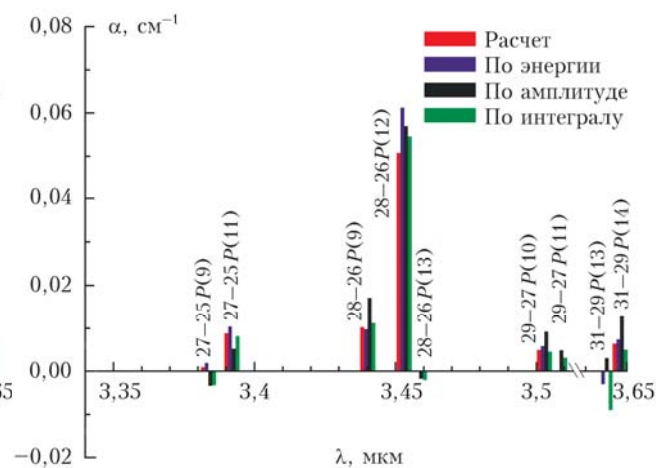


Рис. 9. Рассчитанные по базе данных HITRAN и измеренные тремя методами (при увеличенной трассе) коэффициенты поглощения излучения оберточного СО-лазера в газовой смеси $\text{CH}_4:\text{N}_2 = 1:49$ при давлении 1 атм

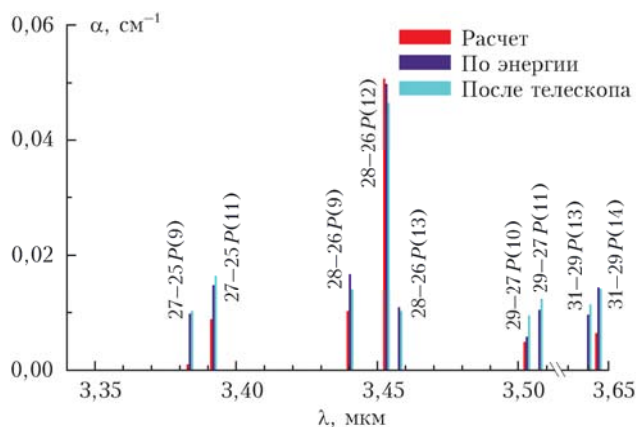


Рис. 10. Рассчитанные по базе данных HITRAN и измеренные (после прохождения телескопа) коэффициенты поглощения излучения оберточного СО-лазера в газовой смеси $\text{CH}_4:\text{N}_2 = 1:49$ при давлении 1 атм