

УДК 551.501.5

Методика и результаты поиска информативных длин волн зондирования газовых компонент атмосферы

О. А. Романовский

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск, Россия

На базе обоснованных критериев отбора линий поглощения и предложенного алгоритма расчета пропускания атмосферы разработана методика поиска информативных длин волн для лазерного газоанализа по методу дифференциального поглощения (МДП). Описанная методика поиска может быть применена в любых спектральных диапазонах при условии дополнения архивных данных о лазерных источниках. Приведены результаты поиска информативных длин волн зондирования в средней ИК-области спектра. Проведенные расчеты подтверждают перспективность применения широкодиапазонного СО-лазера для дистанционного лазерного зондирования малых газовых составляющих атмосферы по МДП.

PACS: 41.20.-q

Введение

В настоящее время лазерное зондирование малых газовых составляющих (МГС) атмосферы по МДП принципиально реализовано, однако из-за технической сложности лидаров измерения проводились только периодически. В связи с этим ставится задача повышения эффективности и информативности каждого измерения, решение которой возможно путем предварительного численного моделирования [1, 2] и анализа методических аспектов зондирования газового состава атмосферы [3, 4].

Разработка новых эффективных источников лазерного излучения на основе широкодиапазонных ИК молекулярных лазеров, а также параметрических преобразователей частоты на основе нелинейных кристаллов, позволяющих путем генерации обертонов, гармоник, суммарных и разностных частот излучения лазеров перекрыть спектральный диапазон от 2 до 18 мкм [5], являющийся наиболее информативным с точки зрения лазерного газоанализа по МДП, ставит проблему поиска линий поглощения, оптимальных для лазерного зондирования МГС. Такой поиск проводился, например, в работе [6], но без привязки к конкретным лазерным источникам.

Цель данной работы — разработка методики поиска и нахождение с ее помощью информативных длин волн для лазерного газоанализа по МДП с использованием широкодиапазонного СО-лазера.

Методика поиска информативных длин волн зондирования МГС

Критерии отбора линий поглощения

При трассовом лазерном газоанализе по МДП концентрация газовых составляющих имеет следующий вид [7]:

$$n(z) = \frac{1}{(\Delta K(\lambda)z)} [\ln P(\lambda_1, z) - \ln P(\lambda_2, z)], \quad (1)$$

где $P(\lambda_{1,2}, z)$ — сигналы, регистрируемые приемником лазерного излучения с трассы зондирования длиной z на длинах волн λ_1 и λ_2 , расположенных в узком спектральном диапазоне в линии поглощения исследуемого газа и в соседнем с ней окне прозрачности, соответственно;

$\Delta K(\lambda)$ — дифференциальный коэффициент поглощения

$$\Delta K(\lambda) = K(\lambda_1) - K(\lambda_2), \quad (2)$$

где $K(\lambda_{1,2}, z)$ — коэффициенты поглощения в и вне линии поглощения, соответственно, которые на частоте ν , соответствующей длине волны λ , для случая приземной трассы зондирования хорошо описываются с помощью лоренцевского контура

$$K_L(\nu) = \frac{S(\nu)}{\pi} \frac{\gamma_L(\nu)}{(\gamma_L^2(\nu) + (\nu - \nu_0)^2)}, \quad (3)$$

где S и γ_L — интенсивность и полуширина линии поглощения на частоте ν , соответственно.

Как видно из соотношений (2) и (3), для того чтобы МДП был чувствителен к изменениям концентраций газовых компонент атмосферы, необходимо иметь достаточную разность сигналов от лазерных импульсов в и вне линии поглощения, причем согласно [8] для типичных, применяемых в экспериментах устройств регистрации и цифровой обработки приемлемое значение разности логарифмов в (2) должно удовлетворять следующему условию:

$$\ln P(\lambda_1, z) - \ln P(\lambda_2, z) \geq 0,01. \quad (4)$$

Исходя из этого значения разности логарифмов определим значение минимальных интенсивностей линий поглощения S_{\min} , при которых еще возможно определение концентраций исследуемых газов в свободной атмосфере. Для этого примем длину трассы зондирования равной 10 км, что соответствует максимальному расстоянию, с которого еще возможна регистрация сигналов в трассовом газоанализаторе на основе серийных перестраиваемых СО-лазеров с высокоэффективными приемниками.

В качестве верхней границы величины концентрации газа $n(z)_{\max}$ будем использовать либо значение предельно допустимых концентраций (ПДК), либо максимальную фоновую концентрацию, а в качестве нижней — $n(z)_{\min}$ минимальное фоновое значение концентрации. В качестве популяризации $\gamma_L(\nu)$ будем использовать наиболее типичные ее значения для исследуемого спектрального диапазона и данного газа, взятые из работы [9].

Результаты такой оценки, проведенной при условии отсутствия мешающего поглощения и поглощения вне линии, вместе с используемыми значениями $n(z)$ и $\gamma_L(\nu)$ приведены в табл. 1, в которой также дан искомый диапазон интенсивностей от $S_{\min1}$ до $S_{\min2}$, причем при уменьшении длины трассы этот диапазон смещается в сторону увеличения.

Таким образом, в качестве критерия отбора линий поглощения по их концентрационной чувствительности может быть рассмотрено значение интенсивностей линий поглощения $S_{\min2}$ (см. табл. 1), рассчитанные для используемой при зондировании трассы и максимально возможной концентрации исследуемого газа.

Если записать выражение (2) с учетом одновременного поглощения n газами, то оно примет следующий вид:

$$\Delta K(\lambda) = \sum_{i=1}^n K_i(\lambda_1) - \sum_{i=1}^n K_i(\lambda_2), \quad (5)$$

где $K_i(\lambda_{1,2})$ — коэффициенты поглощения на длинах волн λ_1 и λ_2 для i -го газа атмосферы.

Таблица 1

Выбор оптимальных интенсивностей линий поглощения для приземной 10-км трассы

Газ	$\gamma_L, \text{см}^{-1}$	$n_{\min}, \text{г/м}^3$	$n_{\max}, \text{г/м}^3$	$S_{\min1}, \text{см/молек.}$	$S_{\min2}, \text{см/молек.}$
СО	0,070	$3,48 \cdot 10^{-5}$	$20,0 \cdot 10^{-3}$	$1,55 \cdot 10^{-20}$	$2,50 \cdot 10^{-23}$
NO	0,055	$1,23 \cdot 10^{-7}$	$5,00 \cdot 10^{-3}$	$4,22 \cdot 10^{-18}$	$7,22 \cdot 10^{-23}$
N ₂ O	0,080	$5,26 \cdot 10^{-4}$	$5,00 \cdot 10^{-3}$	$1,27 \cdot 10^{-21}$	$1,52 \cdot 10^{-22}$
OCS	0,070	$1,23 \cdot 10^{-6}$	$10,0 \cdot 10^{-3}$	$7,62 \cdot 10^{-19}$	$9,64 \cdot 10^{-23}$
CO ₂	0,072	$6,05 \cdot 10^{-1}$	$6,57 \cdot 10^{-1}$	$1,12 \cdot 10^{-24}$	$1,03 \cdot 10^{-24}$
H ₂ O	0,100	1,2	14,0	$3,25 \cdot 10^{-25}$	$2,74 \cdot 10^{-26}$

При работе по двухчастотному МДП “полезным” является эффект поглощения только одним исследуемым газом, влияние же поглощения сторонними газами будет приводить к систематическим ошибкам. Этот эффект, часто называемый мешающим поглощением, необходимо учитывать при выборе линий поглощения, информативных для газоанализа.

Исходя из условия (4), возможны два варианта отбора линий поглощения по принципу наименьшего влияния на результаты измерений мешающего поглощения: либо по малости мешающего поглощения, когда суммарное пропускание по всем сторонним газам не должно быть больше 0,99 для данной трассы зондирования, либо по равенству его как в, так и вне линии поглощения при условии, что суммарное пропускание по всем присутствующим в атмосфере газам не будет меньше 0,01.

Для работы по МДП требуется наличие в узком спектральном интервале как достаточно мощной линии поглощения исследуемого газа, так и окна прозрачности λ_2 , в котором зондируемая компонента атмосферы либо не поглощает лазерное излучение, либо поглощает достаточно слабо по сравнению с длиной волны λ_1 .

Узость спектрального диапазона между двумя длинами волн зондирования обусловлена прежде всего влиянием на ослабление лазерного излучения аэрозолей атмосферы. Анализ кривых спектрального хода коэффициентов аэрозольного ослабления, приведенных в аэрозольной модели Крекова и Рахимова [10], показал, что выбор двух длин волн зондирования λ_1 и λ_2 следует производить на расстоянии между ними по спектру, не большим 5 см^{-1} .

Возникает также вопрос о критериях выбора вариантов организации требуемой частоты линии лазерного излучения, в достаточной степени совпадающей с центром линии поглощения исследуемого газа.

Так как вопрос о выборе величины несовпадения центров линий излучения и поглощения является многопараметрической задачей, т. е.

$$\Delta \nu = f(\nu, n, S, \gamma, T, P), \quad (6)$$

то не удастся найти такое значение $\Delta \nu$, которое предусматривало бы любые спектральные и атмосферные ситуации с учетом выполнения требования о достаточности величины дифференциального коэффициента поглощения $\Delta K(\nu)$.

В связи с этим $\Delta \nu$, с нашей точки зрения, следует выбирать исходя из конкретных условий зондирования. Первый шаг — расчет для данных условий пропускания T_ν в центре выбранной линии поглощения, затем с шагом $0,01 \text{ см}^{-1}$ в обе стороны от центра рассчитывается пропускание на сме-

щенных частотах ν_i , причем каждый раз проверяется выполнение условия концентрационной чувствительности. Две точки спектра пропускания в обе стороны от центра линии поглощения и являются границами спектрального интервала $\Delta\nu$, в пределах которого следует искать комбинированные лазерные частоты.

Алгоритм расчета пропускания атмосферы

Для того чтобы определить информативные для зондирования линии поглощения, необходимо достаточно точно и быстро рассчитать пропускание атмосферы для заданной точки спектра. Из множества существующих методов расчета наиболее точным является метод полинейного счета, учитывающий тонкую структуру спектра и не имеющий ограничений на спектральное разрешение. Наиболее универсальной является методика, используемая в автоматизированной системе расчета пропускания атмосферы *LARA* [11]. Однако эта система имеет один существенный недостаток — неоправданно большое, с нашей точки зрения, время счета, особенно это касается самого простого случая — расчета пропускания для монохроматических источников лазерного излучения, работающих в условиях приземного слоя атмосферы.

При расчете по методу “линия за линией” основной величиной, определяющей точность расчета пропускания, является ширина спектрального диапазона $\Delta\nu$, в пределах которого производится расчет коэффициента поглощения с учетом всех находящихся в нем линий поглощения.

Как было показано выше, длины волн λ_1 и λ_2 , на которых осуществляется зондирование, должны находиться друг от друга на расстоянии не более 5 см^{-1} . Следовательно, линия поглощения, находящаяся на удаленном от рассчитываемой точки спектра пропускания $T(\lambda_1)$ расстоянии, не играет при расчете существенной роли, если в пределах указанного 5 см^{-1} -спектрального диапазона между λ_1 и λ_2 учет этой линии не дает изменений в пропускании более 1 %, т. е.

$$T(\lambda_1)/T(\lambda_2) \leq 0,99. \quad (7)$$

Исходя из этого критерия и известных данных об интенсивностях линий поглощения для различных газов и диапазонов спектра [5], попытаемся определить участок спектра $\Delta\nu$, в пределах которого следует учитывать вклад всех линий поглощения.

Пропускание для точки спектра ν с учетом линии поглощения, находящейся на расстоянии $\Delta\nu$ по спектру, может быть записано для лоренцевского контура следующим образом:

$$T(\nu) = \exp \left\{ - \left[\frac{a}{\gamma_L^2(\nu) + \Delta\nu^2} \right] \right\}, \quad (8)$$

$$\text{где} \quad a = 1/\pi S(\nu)\gamma_L(\nu)z n(z). \quad (9)$$

С помощью введенного параметра a удается оценить величину $\Delta\nu$. Результаты такой оценки приведены на рис. 1. По оси абсцисс отложены значения параметра a , который может изменяться в широких пределах, по оси ординат — значение величины спектрального интервала $\Delta\nu$, в пределах которого выполняется условие (7) для различных значений расстояний между ν_1 и ν_2 (в см^{-1}), соответствующих λ_1 и λ_2 (кривая 1 — $|\nu_1 - \nu_2| = 5 \text{ см}^{-1}$; кривая 2 — 2 см^{-1} ; кривая 3 — 1 см^{-1}). Из рис. 1 видно, что при увеличении расстояния между ν_1 и ν_2 значения $\Delta\nu$ существенно возрастают.

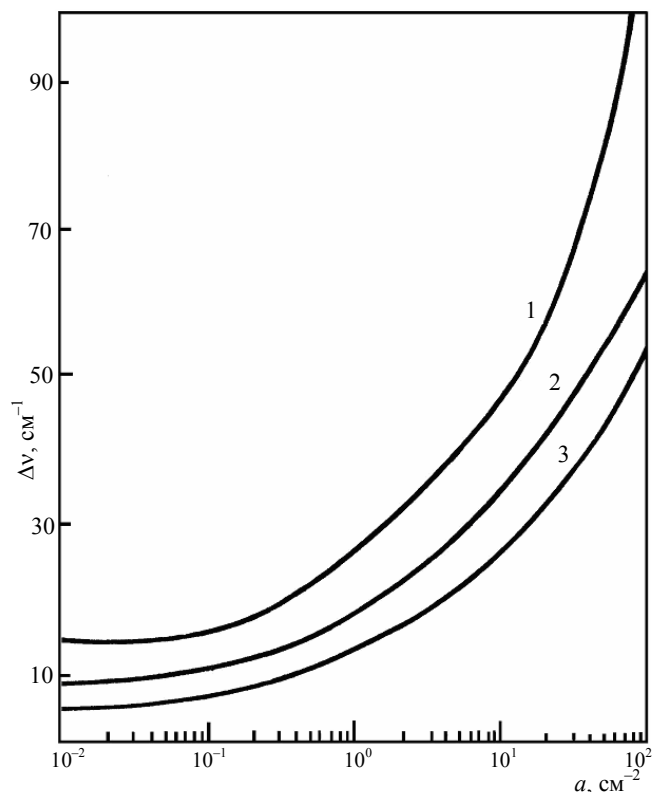


Рис. 1. Выбор спектрального интервала $\Delta\nu$ для разных расстояний между ν_1 и ν_2

Графические зависимости, приведенные на рис. 1, в табличном виде заложены в программу вычисления пропускания и позволяют автоматически определять значение спектрального интервала $\Delta\nu$, в пределах которого выполняется условие (7), и, следовательно, с заданной точностью рассчитывается пропускание.

Общая схема работы автоматизированной системы поиска

Критерии отбора линий поглощения и алгоритм расчета пропускания атмосферы, изложен-

ные выше, легли в основу системы поиска информативных длин волн для лазерного газоанализа методом дифференциального поглощения.

Систему поиска (рис. 2) можно разделить на две составляющие — архивный блок и расчетный.

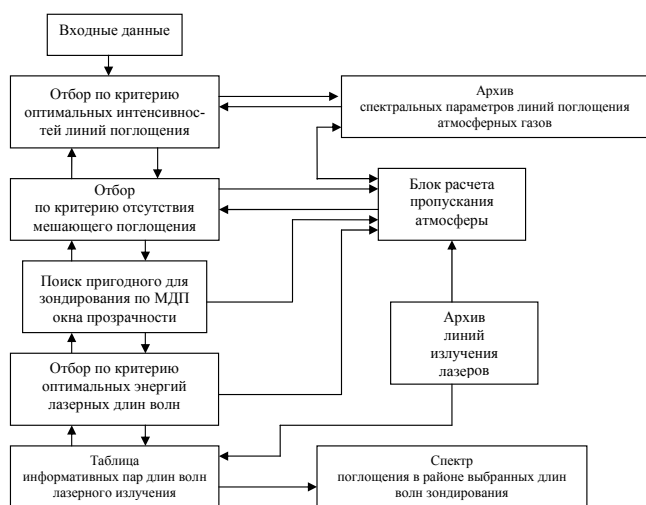


Рис. 2. Общая схема работы системы поиска информативных длин волн для лазерного зондирования МГС по МДП

Архивный блок:

- атлас линий поглощения атмосферных газов [12] — самый большой по объему используемой памяти;
- архив линий излучения различных лазеров ИК-диапазона, содержащий параметры линий генерации CO₂- и СО-лазеров различного изотопного состава, аммиачного лазера и других [13], дополненный данными по генерации на ИК-переходах в ТЕА-лазерах XeI, KrI, ArI и NeI [14]. Метеомодели взяты из работы [15] и дополнены данными о концентрации ряда газовых составляющих из работ [16, 17];
- информация об аэрозольном ослаблении α_a [10], молекулярном рассеянии α_{ms} [18] и континуальном поглощении α_{cont} [19].

Расчетный блок можно подразделить условно на поисковую часть, собственно производящую отбор линий поглощения атмосферных газов и линий лазерного излучения по описанным выше критериям, и блок расчета пропускания атмосферы.

Результатом работы системы поиска является сводная таблица информативных длин волн зондирования исследуемой газовой компоненты по МДП, в которой приводятся данные о вариантах организации требуемой длины волны как на основной частоте зондирования, так и на референтной.

Таким образом, на базе обоснованных критериев отбора линий поглощения и предложенного алгоритма расчета пропускания атмосферы разработана методика поиска информативных длин волн

для лазерного газоанализа по МДП, позволяющая резко сократить время счета при выборе информативных длин волн зондирования, так как она не требует расчета с высоким разрешением спектров пропускания в широких спектральных диапазонах.

Результаты поиска информативных длин волн зондирования МГС атмосферы

Развитие лазерной дистанционной ИК-спектроскопии требует разработки и внедрения новых лазерных источников излучения в среднем ИК-диапазоне, способных генерировать излучение в возможно более широком диапазоне длин волн с малым шагом перестройки частоты излучения. Спектральный диапазон, в котором расположены линии генерации СО-лазера, охватывает участки спектра, которые являются наиболее информативными с точки зрения лазерного зондирования как МГС атмосферы, так и газовых компонент, представляющих собой сильные загрязнители, токсины, взрывчатые или наркотические вещества.

Как показали экспериментальные исследования, такой лазер может излучать более 1000 спектральных линий, из них ~ 400 линий на обертоновых переходах [20], причем расстояние между ними составляет в среднем 1,5 см⁻¹ для основных и 4 см⁻¹ — для обертоновых переходов.

Излучения СО-лазера на переходах первого колебательного обертона достаточно плотно перекрывают спектральный диапазон 2,5—4,2 мкм. Например, на импульсной лазерной установке с криогенным охлаждением была получена генерация обертонового излучения на ~ 400 линиях [20], что иллюстрирует рис. 3, а.

Для изучения возможности применения излучения широкодиапазонного СО-лазера для дистанционного лазерного зондирования МГС атмосферы был рассчитан спектр пропускания атмосферы. Расчет проводили по методу "line by line" с использованием данных о спектральных параметрах линий поглощения основных атмосферных газов для приземной трассы зондирования длиной 1 км и стандартной модели атмосферы (лето, средние широты [15]).

Вычисления проводили для линий излучения обертонового СО-лазера (см. рис. 3, а) с шагом по частоте 0,001 см⁻¹ в предположении, что ширина линий лазерного излучения 0,01 см⁻¹. Результаты этих расчетов представлены на рис. 3, б. Анализ показал, что часть линий излучения обертонового лазера (в интервале длин волн 2,7—2,9 мкм) весьма сложно использовать при трассовом газоанализе

зе атмосферы из-за сильного мешающего поглощения излучения водяным паром. Но наряду с линиями, которые полностью поглощаются на трассе длиной 1 км, в спектре обертонового СО-лазера имеются линии (в интервале 2,9—3,4 мкм), которые попадают в "микроокна" прозрачности атмосферы и могут быть использованы при дистанционном зондировании по методу МДП.

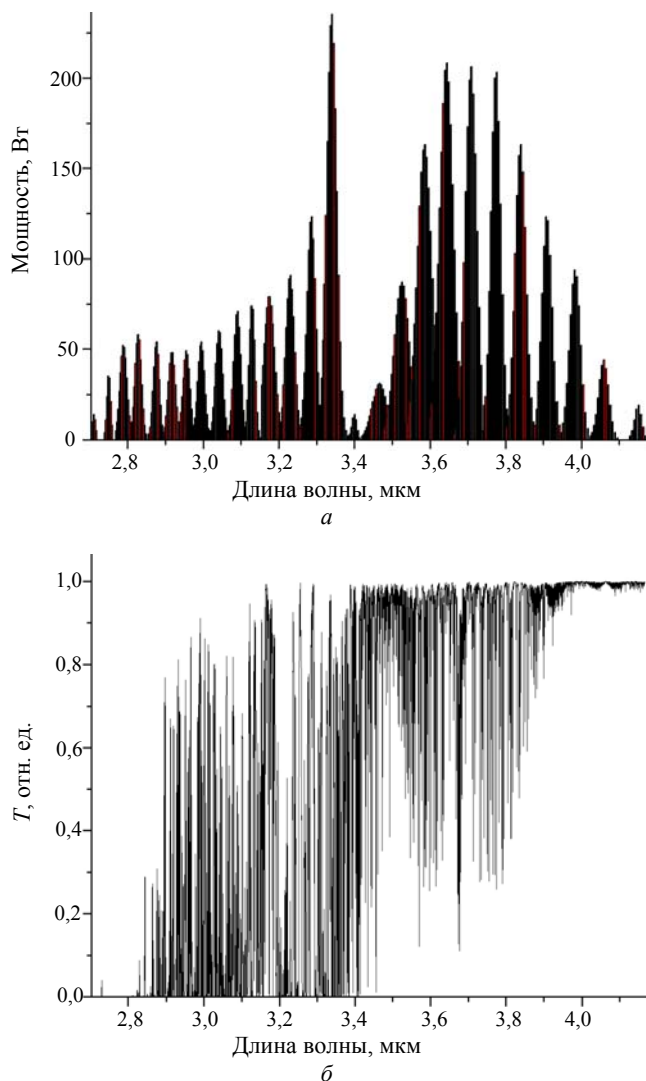


Рис. 3. Мощность излучения импульсного обертонового СО-лазера, действующего в частотно-селективном режиме при перестройке длины волны излучения (а) и коэффициент пропускания T такого излучения на трассе длиной 1 км (б)

• **Закись азота N_2O .** В диапазон спектра 2400—3700 cm^{-1} попадает 30 полос N_2O , в том числе шесть полос, которые соответствуют изотопзамещенным молекулам закиси азота. Наиболее интенсивными среди них являются линии полосы 20^{00} — 00^{00} . Суммарная интенсивность этой полосы составляет $1,201 \cdot 10^{-18}$ см/молек. Однако самая мощная полоса поглощения на переходе 10^{01} — 00^{00} с суммарной интенсивностью $1,732 \cdot 10^{-18}$ см/молек. располагается в интервале 3390—3513 cm^{-1} и на-

ходится в области сильного мешающего поглощения излучения водяным паром, вследствие чего ее сложно использовать при дистанционном детектировании закиси азота. Выбранные линии поглощения N_2O и линии лазерного излучения, пригодные для зондирования закиси азота на приземной трассе длиной 1 км, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Линии излучения обертонового СО-лазера, пригодные для зондирования N_2O

№ линии	ν_{em}, cm^{-1}	ν_{ab}, cm^{-1}	$\Delta\nu, cm^{-1}$	T_{N_2O}	$T_{mix.ab}$
1	2576,589	2576,656	0,067	0,80	0,99
2	2578,715	2578,667	0,048	0,75	0,99
3	2584,714	2584,737	0,023	0,79	0,99
4	2588,461	2588,446	0,015	0,86	0,99
5	3493,206	3493,249	0,043	0,84	0,28

В табл. 2—10 показаны центры линий поглощения атмосферных газов ν_{ab} и ближайшие к ним центры линий излучения СО-лазера ν_{em} , а также величина отстройки $\Delta\nu$ между центрами линий поглощения и излучения. Представлены коэффициенты пропускания T на приземной трассе 1 км при поглощении только исследуемым газом и коэффициент пропускания мешающих газов $T_{mix.ab}$, который рассчитывался по линиям поглощения, расположенным на расстоянии не более 10 cm^{-1} от центра лазерной линии.

Отметим, что при работе по МДП "полезным" является эффект поглощения только одним исследуемым газом, поглощение сторонними газами будет приводить к систематическим ошибкам. Этот эффект, часто называемый мешающим поглощением, необходимо учитывать при выборе линий поглощения, информативных для газоанализа. Для работы по МДП требуется наличие в узком спектральном интервале как достаточно мощной линии поглощения исследуемого газа, так и микроокна прозрачности, в котором зондируемая компонента атмосферы либо не поглощает лазерное излучение, либо поглощает достаточно слабо.

Для обнаружения закиси азота линию № 5 (см. табл. 2) можно использовать только в условиях пониженной влажности, т. е. при отсутствии мешающего поглощения H_2O .

• **Метан CH_4 .** Для зондирования метана по МДП можно использовать полосы поглощения в ближней и средней ИК-областях спектра. Среди линий излучения обертонового СО-лазера авторами были отобраны шесть линий поглощения и излучения (табл. 3), пригодных для зондирования метана на приземной трассе. Применение этих линий для зондирования позволяет определять фоновое содержание метана на атмосферных трассах различной протяженности: линии № 1—3 и 5 можно

использовать на трассах длиной 0,1—1 км, а более мощную линию поглощения метана № 4 — на коротких трассах длиной до 100 м.

Таблица 3

Линии излучения обертоного СО-лазера, пригодные для зондирования метана

№ линии	$\nu_{em}, \text{см}^{-1}$	$\nu_{ab}, \text{см}^{-1}$	$\Delta\nu, \text{см}^{-1}$	T_{CH_4}	$T_{\text{mix. ab}}$
1	2895,860	2895,866	0,006	0,70	0,98
2	2916,983	2916,980	0,003	0,59	0,99
3	2948,200	2948,283	0,083	0,87	0,97
4	3018,048	3018,002	0,046	0,006	0,83
5	3087,182	3087,265	0,083	0,60	0,75
6	3132,243	3132,258	0,015	0,19	0,38

• *Двуокись азота* NO₂. Зондирование NO₂ возможно в полосе поглощения 00⁰0—10⁰1, расположенной в области 2900 см⁻¹ и имеющей суммарную интенсивность около 3,0·10⁻¹⁸ см/молек. В результате поиска длин волн, пригодных для зондирования NO₂, выбраны шесть линий обертоного СО-лазера, четыре из них представлены в табл. 4.

Таблица 4

Линии излучения обертоного СО-лазера, пригодные для зондирования NO₂

№ линии	$\nu_{em}, \text{см}^{-1}$	$\nu_{ab}, \text{см}^{-1}$	$\Delta\nu, \text{см}^{-1}$	T_{NO_2}	$T_{\text{mix. ab}}$
1	2868,123	2868,019	0,104	0,96	0,96
2	2872,325	2872,351	0,026	0,95	0,95
3	2913,668	2913,691	0,023	0,92	0,98
4	2888,253	2988,247	0,006	0,95	0,99

Следует отметить, что все приведенные линии позволяют работать в условиях атмосферы лета средних широт. Вклад мешающего поглощения водяного пара при этом составляет менее 5 %.

• *Бром- и хлорводород*. В спектральный диапазон излучения обертоного СО-лазера попадают основные колебательно-вращательные полосы поглощения HCl и HBr. Полосы имеют достаточно простую и хорошо изученную структуру. Суммарная интенсивность полос поглощения хлор- и бромводорода составляет 4,5·10⁻¹⁸ и 7,2·10⁻¹⁹ см/молек, соответственно. Центры отдельных линий поглощения этих газов находятся друг от друга на одинаковом расстоянии (~ 15 см⁻¹) и имеют интенсивности 4,5·10⁻¹⁹ и 6,5·10⁻²⁰ см/молек. для молекул HCl и HBr, соответственно. В табл. 5 и 6 приведены линии поглощения и излучения, пригодные для определения в атмосфере бром- и хлорводорода.

Таблица 5

Линии излучения обертоного СО-лазера, пригодные для зондирования HBr

№ линии	$\nu_{em}, \text{см}^{-1}$	$\nu_{ab}, \text{см}^{-1}$	$\Delta\nu, \text{см}^{-1}$	T_{HBr}	$T_{\text{mix. ab}}$
1	2606,880	2606,670	0,214	0,58	0,86
2	2507,710	2507,449	0,271	0,68	0,99
3	2575,593	2575,150	0,443	0,88	0,98

Таблица 6

Линии излучения обертоного СО-лазера, пригодные для зондирования HCl

№ линии	$\nu_{em}, \text{см}^{-1}$	$\nu_{ab}, \text{см}^{-1}$	$\Delta\nu, \text{см}^{-1}$	T_{HCl}	$T_{\text{mix. ab}}$
1	3045,809	3044,237	1,572	0,91	0,92
2	2774,617	2774,941	0,327	0,41	0,99

• *Ацетилен* C₂H₂. Молекула ацетилена линейна, все четыре атома расположены на одной прямой. Вследствие этого структура его спектра достаточно проста и регулярна. В колебательно-вращательных спектрах имеются полосы поглощения валентных колебаний в диапазонах 610—700, 2100—2260 и 3200—3350 см⁻¹. Последняя полоса попадает в диапазон излучения обертоного СО-лазера. В процессе поиска были выбраны следующие линии поглощения ацетилена и линии излучения обертоного СО-лазера, которые приведены в табл. 7. Линия № 2 может быть задействована в трассовых измерениях ацетилена практически для любых уровней влажности (кроме тропиков), тогда как использование линии № 1 возможно только при условии учета мешающего поглощения водяного пара. Использование этих линий дает возможность определять концентрации ацетилена на уровне 0,01 млн⁻¹ и выше.

Таблица 7

Линии излучения обертоного СО-лазера, пригодные для зондирования C₂H₂

№ линии	$\nu_{em}, \text{см}^{-1}$	$\nu_{ab}, \text{см}^{-1}$	$\Delta\nu, \text{см}^{-1}$	$T_{\text{C}_2\text{H}_2}$	$T_{\text{mix. ab}}$
1	3239,076	3238,869	1,207	0,67	0,46
2	3300,438	3300,848	0,510	0,55	0,64

• *Формальдегид* H₂CO. Выбор линий поглощения для зондирования формальдегида оказался сложной задачей, так как в диапазон излучения обертоного СО-лазера попадает семь полос поглощения основного изотопа H₂CO (1161 линия). К тому же спектры поглощения формальдегида и водяного пара плотно перекрываются. Но несмотря на это, имеется несколько линий поглощения и излучения, пригодных для зондирования по методу дифференциального поглощения H₂CO, при этом максимальная интенсивность отдельных линий составляет около 7,5·10⁻²⁰ см/молек., что в принципе позволяет определять содержание формальдегида на уровне 10 млрд⁻¹. Выбранные линии поглощения и лазерного излучения, пригодные для зондирования H₂CO, приведены в табл. 8.

Таблица 8

Линии излучения обертонового СО-лазера,
пригодные для зондирования Н₂СО

№ линии	$\nu_{em}, \text{см}^{-1}$	$\nu_{ab}, \text{см}^{-1}$	$\Delta\nu, \text{см}^{-1}$	$T_{\text{H}_2\text{CO}}$	$T_{\text{mix. ab}}$
1	2750,956	2751,032	0,076	0,68	0,99
2	2775,927	2775,998	0,071	0,73	0,99
3	2795,404	2795,567	0,163	0,77	0,99
4	2806,308	2806,244	0,064	0,50	0,99

• Синильная кислота HCN. Мощная полоса поглощения HCN находится в диапазоне спектра 3150—3450 см^{-1} . Молекула линейна, длина связи С—Н равна 0,1064 нм, С—N — 0,1156 нм. Вследствие линейности спектр поглощения имеет достаточно простую и хорошо изученную структуру. Так же, как и у формальдегида, полоса поглощения HCN перекрывается полосой поглощения водяного пара. Несмотря на это найдено несколько линий поглощения и излучения, пригодных для зондирования по МДП, они представлены в табл. 9.

Результаты поиска информативных длин волн, пригодных для зондирования МГС атмосферы, представлены в сводной табл. 10.

Таблица 9

Линии излучения обертонового СО-лазера,
пригодные для зондирования HCN

№ линии	$\nu_{em}, \text{см}^{-1}$	$\nu_{ab}, \text{см}^{-1}$	$\Delta\nu, \text{см}^{-1}$	T_{HCN}	$T_{\text{mix. ab}}$
1	3300,438	3300,384	0,054	0,24	0,64
2	3346,496	3347,087	0,509	0,75	0,75
3	3350,308	3350,996	0,678	0,95	0,77

Таблица 10

Информативные длины волн, наиболее пригодные
для зондирования МГС излучением обертонового СО-лазера

Газ	$\nu_{em}, \text{см}^{-1}$	$\nu_{ab}, \text{см}^{-1}$	$\Delta\nu, \text{см}^{-1}$	T_{gas}	$T_{\text{mix. ab}}$
N ₂ O	2578,715	2578,667	0,048	0,75	0,99
CH ₄	3018,048	3018,002	0,046	0,06	0,83
NO ₂	2913,668	2913,691	0,023	0,92	0,98
HBr	2507,710	2507,449	0,271	0,68	0,99
HCl	2774,617	2774,941	0,327	0,41	0,99
C ₂ H ₂	3300,438	3300,848	0,510	0,55	0,64
H ₂ CO	2806,308	2806,244	0,064	0,50	0,77
HCN	3346,496	3347,087	0,509	0,75	0,75

Заключение

Проведенные эксперименты и расчеты подтверждают перспективность применения широкодиапазонного СО-лазера для дистанционного лазерного зондирования МГС атмосферы по МДП. Приведенный в табл. 10 список газов является не-

полным, так как в спектральном диапазоне излучения СО-лазера находятся линии поглощения других МГС атмосферы.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ № 07-05-00765-а) и Федерального агентства по науке и инновациям (государственный контракт № 02.518.11.7088).

Литература

1. Романовский О. А. // Прикладная физика. 2006. № 2. С. 30.
2. Зуев В. В., Фирсов К. М. // Исследования Земли из космоса. 2006. № 1. С. 45.
3. Kooi Susan A., Browell Edward V., Ismail Syed et al. Characterization of error sources for airborne and space-based CO₂ DIAL measurements. — In.: The 23rd "International Laser Radar Conference (ILRC 2006)", Reviewed and Revised papers presented. Nara, Japan. 2006. PD2-3. P. 767.
4. Романовский О. А. // Известия вузов. Сер. Физика. 2008. № 6. С. 73.
5. Андреев Ю. М., Гейко П. П., Грибеноков А. И., Зуев В. В., Романовский О. А. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 3. С. 20.
6. Войцеховская О. К., Сулакишина О. Н., Черепанов В. Н. // Известия АН СССР. Сер. ФАО. 1980. Т. 16. № 3. С. 322.
7. Межерис Р. М. Лазерное зондирование атмосферы. — М.: Мир, 1987.
8. Лазерный контроль атмосферы/Под ред. Е. Д. Хинкли. — М.: Мир, 1976.
9. Husson N., Chedin A., Scotte N. E. et al. // Ann. Geoph., Fasc. 2. Ser. A. 1986. P. 185.
10. Креков Г. М., Рахимов Р. Ф. Опτικο-локационная модель континентального аэрозоля. — г. Новосибирск: Наука, 1982.
11. Зуев В. Е., Макушкин Ю. С., Мицель А. А. и др. // ДАН СССР. 1985. Т. 283. № 2. С. 345.
12. Rothman L. S., Gamache R. R., Tipping R. H. et al. // JQSRT. 2005. V. 96. P. 139.
13. Beck R., English W., Gurs K. Table of laser lines in gases and vapors. — Berlin, Heidelberg, New York: Springer — Verlag, 1978.
14. Петухов В. О., Тоцицкий С. Я., Чураков В. В. // Квантовая электроника. 1988. Т. 15. № 3. С. 503.
15. Зуев В. Е., Комаров В. С. Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы. — Л.: Гидрометеоиздат, 1986.
16. US standard 1976. — NESS: Washington, 1977.
17. Кароль И. Л., Розанов В. В., Тимофеев Ю. Н. Газовые примеси в атмосфере. — Л.: Гидрометеоиздат, 1983.
18. McCatchey R. A., Fenn R. W., Selby J. E. A. et al. Optical properties of atmosphere: Report AFCRL-71-0297, Bedford: Mass., 1971.
19. Несмелова Л. И., Родимова О. Б., Творогов С. Д. Контуры спектральной линии и межмолекулярное взаимодействие. — г. Новосибирск: Наука, 1986.
20. Basov N. G., Hager G. D., Ionin A. A., Kotkov A. A., Kur-nosov A. K., McCord J. E., Napartovich A. P., Seleznev L. V., Turkin N. G. // IEEE Journal of quantum electronics. 2000. № 7. P. 810.

Статья поступила в редакцию 19 июня 2008 г.

Technique and search results of atmosphere gas component sounding informative wavelengths

O. A. Romanovsky

Institute of Atmospheric Optics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Tomsk, Russia

On the basis of the proved absorption lines selection criteria and the offered atmosphere transmittance calculation algorithm the technique of informative wavelengths search for laser gas analyses on DIAL is developed. The described search technique can be applied in any spectral ranges under condition of addition of contemporary records about laser sources. Results of informative sounding wavelengths search in middle IR spectral range areas are resulted. The carried out calculations confirm perspectivity of CO-laser application for small-concentration atmosphere gas components remote laser sounding on DIAL.

PACS: 41.20.-q

УДК 535.243:543.42

Распространение света в кристаллах при наличии рассеяния

А. И. Колесников, А. В. Шелопаев, И. А. Каплунов, И. В. Талызин, В. Н. Горшков
Тверской государственный университет, г. Тверь, Россия

Теоретически и экспериментально показано, что при наличии рассеяния в кристаллах, методы расчета показателей ослабления света, основанные на законе Бугера, приводят к существенным погрешностям при оценках оптических характеристик материалов. Предложена методика оценки соотношения между вероятностями рассеяния и поглощения в оптических кристаллах.

PACS: 41.20.-q

Введение

Отклонения от экспоненциального характера ослабления света, определяемого законом Бугера, известны достаточно давно и изучались в основном экспериментально [1—6]. Объектами исследований являлись, как правило, не кристаллы, а жидкости, мутные стекла, аэрозоли. В данных средах наиболее отчетливо проявляется причина ослабления распространения в веществе света за счет рассеяния. При существенном рассеянии в объектах для вошедшего в исследуемую среду параллельного пучка света с интенсивностью I_0 не выполняются соотношения для ослабления интенсивности излучения, как учитывающие, так и не учитывающие рассеяние

$$I = I_0 \exp(-\alpha_{ab} h); \quad (1)$$

$$I = I_0 \exp(-\alpha_r h) = I_0 \exp[-(\alpha_{ab} + \alpha_{sow}) h], \quad (2)$$

где I — интенсивность вышедшего излучения;

α_{ab} — показатель поглощения;

h — толщина среды;

α_{sow} — показатель рассеяния;

$\alpha_r = \alpha_{ab} + \alpha_{sow}$ — показатель экстинкции (ослабления) света.

Формула (1) справедлива только при полном отсутствии рассеяния, а формула (2) — только по отношению к так называемым "баллистическим" фотонам, которые не испытывают ни поглощения, ни рассеяния. На самом деле рассеянные фотоны могут в результате отражений от границ среды или следующих актов рассеяния вновь продвигаться вперед и вносить свой вклад в световой поток, фиксируемый фотоприемником, расположенным на одной оси исходного пучка за исследуемым веществом.

Наличие неоднократного рассеяния сильнее-шим образом усложняет решение задачи о распространении света в различных средах [1, 5], причем в случае кристаллов необходимо учитывать рассеяние и отражение на полированных торцах и, как правило, на неполированной боковой поверхности образцов [7].