

УДК 621.551.508

Г. К. Васильев, А. Н. Житов, И. П. Супрун, А. И. Холодных

*(Москва)***ДИСТАНЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА АЭРОЗОЛЕЙ
МЕТОДОМ СПЕКТРАЛЬНЫХ РЕЗОНАНСОВ
В ОБРАТНОМ РАССЕЯНИИ**

Описывается метод лазерной дистанционной диагностики атмосферных аэрозолей, основанный на анализе спектральных характеристик обратного рассеяния, излагается его реализация и применение.

Введение. Одной из важнейших задач диагностики атмосферных аэрозольных образований, особенно при различного рода чрезвычайных ситуациях на химически опасных объектах, имеющих дело с сильнодействующими ядовитыми веществами, является оперативное определение состава и массы (интегральных содержаний) выброса химических веществ, а также геометрических параметров облака сильнодействующих ядовитых веществ и его распространения.

Практически единственный эффективный метод дистанционной оперативной диагностики химического состава и дисперсности аэрозольных выбросов – метод спектральных резонансов в обратном рассеянии [1–3], основанный на изучении дисперсии амплитуды сигнала обратного рассеяния электромагнитного излучения, перестраиваемого по частоте в области полос поглощения аэрозоля и попадающего в одно из окон прозрачности атмосферы (2,0–2,5; 3–5; 9–11; 12–14 мкм) [4, 5]. Этот метод по сравнению с традиционными методами многочастотного зондирования [6, 7] позволяет определять не только размеры частиц, но и химический состав аэрозоля и обладает более высокими аналитическими возможностями, так как изменение сигнала обратного рассеяния в области спектральных резонансов может достигать двух десятичных порядков, в то время как изменение сигнала в зависимости от размера частиц при многочастотном зондировании в области прозрачности не превышает двух–трех раз.

Понятие спектрального резонанса в обратном рассеянии применительно к задачам дистанционного зондирования введено, по-видимому, впервые в 1972 г. [1], где показано, что спектры обратного рассеяния модельного водного аэрозоля хорошо коррелируют со спектральным ходом действительной и мнимой части комплексного показателя преломления воды. Отмечена принципиальная возможность использования спектральных наблюдений обратного рассеяния для дистанционной спектроскопии материала аэрозолей. Ак-

куратное сравнение расчетных и экспериментальных спектров обратного рассеяния аэрозолей H_2SO_4 и сульфата аммония в области генерации CO_2 -лазера, проведенное в 1982 г. [2], показало, что расчеты по теории Ми удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными и в области поглощения вещества аэрозоля.

Исследование возможности определения среднего размера частиц полидисперсного аэрозоля по характеристикам спектральных резонансов проведено в наших работах [4, 5, 8], результаты которых обобщены в данном сообщении.

Теория. Рассмотрим упрощенно физическую природу возникновения спектральных резонансов в обратном рассеянии и аналитические возможности их использования для определения состава и дисперсности аэрозолей.

Как показывают расчеты по теории Ми [9], сигнал обратного рассеяния формируется как за счет дифракции излучения, так и за счет внутрипреломленной составляющей рассеяния. Весомый вклад в обратное рассеяние в области прозрачности частиц вносят именно внутрипреломленные компоненты. Количественное соотношение между ними определяется действительной (n) и мнимой (κ) частью комплексного показателя преломления $m(\lambda) = n(\lambda) + i\kappa(\lambda)$ и относительным размером рассеивающей частицы $\rho(\lambda) = 2\pi r/\lambda$, где r – радиус частицы; λ – длина волны дифрагирующего излучения.

Результаты расчета зависимости фактора эффективности обратного рассеяния $Q_\pi(\rho)$ от величины κ для ряда фракций полидисперсного аэрозоля с различным эффективным размером частиц $r_{эф}$ приведены на рис. 1.

Рассчитаем фактор эффективности обратного рассеяния полидисперсного аэрозоля:

$$Q_\pi(r_{эф}) = N \int Q_\pi(r) S(r) n(r) dr,$$

где $r_{эф} = 1/\sqrt{\pi} \left(\int S(r) n(r) dr \right)^{1/2}$ – средний эффективный радиус частиц; N – число частиц в единице объема; $Q_\pi(r)$ – фактор эффективности обратного рассеяния частицы радиусом r [9]; $S(r)$ – площадь сечения частицы радиусом r ; $n(r)$ – доля частиц радиусом r .

Интегрирование проведено в предположении логарифмически нормального распределения частиц по размерам с характерной шириной, определяемой r_{min} и r_{max} .

Из рис. 1 видно, что в зависимости от величины показателя поглощения κ Q_π может изменяться практически на два порядка, достигая своего минимума при различных значениях κ , зависящих от среднего размера частиц аэрозоля. Анализ показывает, что в единицах параметра κr минимум Q_π достигается при значениях $\kappa r \geq 0,5$, а максимум – при $\kappa r \leq 0,05$. Таким образом, если известна величина κ исследуемого аэрозоля, то, измерив сигнал обратного рассеяния

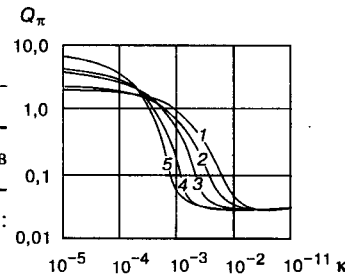


Рис. 1. Зависимость $Q_\pi(r_{эф})$ от показателя поглощения материала для различных средних относительных размеров частиц $\rho = 2\pi r_{эф}/\lambda$ (показатель преломления $n = 1,47$; интервал усреднения $\Delta\rho = 20$; шаг усреднения по $\rho = 0,4$: кривая 1 – $\rho = 75$, 2 – 155, 3 – 300, 4 – 600, 5 – 900

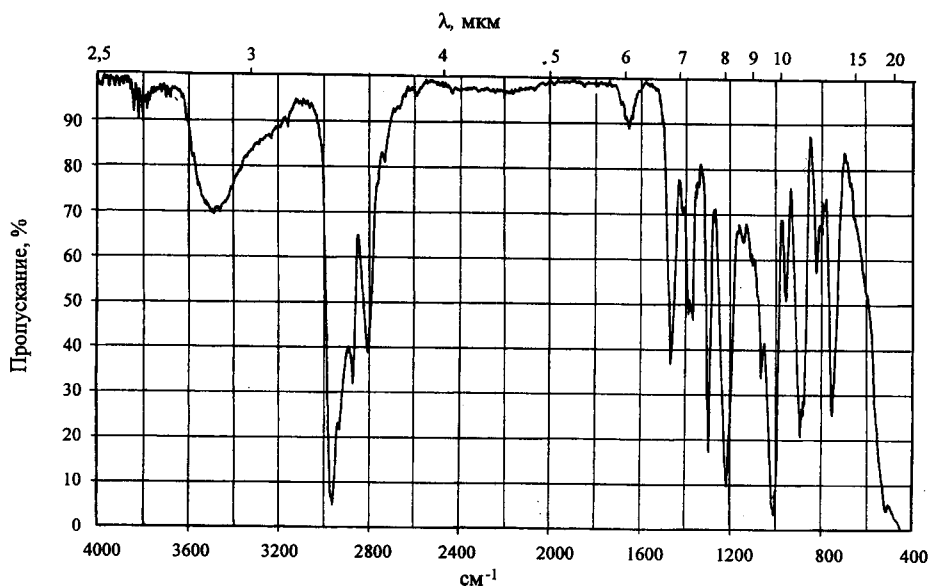


Рис. 2. ИК-спектр пропускания трибутиламина

и определив величину фактора эффективности Q_{π} , можно оценить средний размер частиц аэрозоля. Как известно, экспериментально гораздо проще проводить относительные измерения. Поэтому более эффективен дифференциальный метод определения среднего размера частиц полидисперсного аэрозоля, когда определяются не сами величины Q_{π} , а их отношение для двух длин волн, лежащих в области прозрачности (λ_1) и в полосе поглощения (λ_2) материала аэрозоля, причем это отношение будет максимально, если выполняются вышеуказанные условия: $k(\lambda_1)\rho \leq 0,05$, $k(\lambda_2)\rho \geq 0,5$. Чтобы получить максимальную чувствительность диагностики аэрозолей в зависимости от их дисперсности и соответственно удовлетворить условию $k(\lambda_2)\rho \geq 0,5$, необходимо использовать различные полосы поглощения вещества с соответствующими значениями k . Наличие большого количества полос поглощения в спектрах высокомолекулярных соединений, к которым относится большинство сильнодействующих ядовитых веществ, дает широкие возможности для решения этой проблемы.

На рис. 2 приведен ИК-спектр пропускания трибутиламина, демонстрирующий наличие полос от $k < 10^{-4}$ до $k \approx 1$, т. е. полос, оптимальных для диа-

гностики как грубодисперсных фракций с $\rho = 10^3 - 10^4$, так и субмикронных частиц.

На рис. 3 представлены расчетные дисперсионные зависимости фактора эффек-

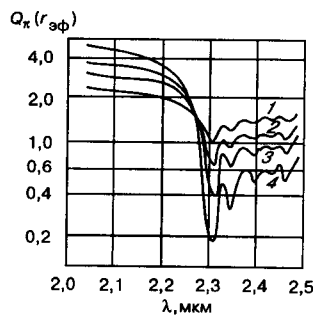
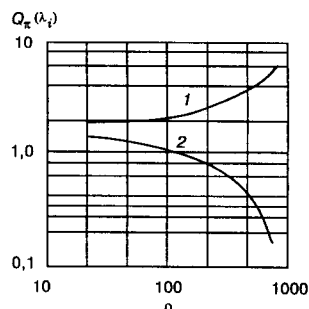


Рис. 3. Спектральные зависимости фактора эффективности обратного рассеяния $Q_{\pi}(r_{эф})$ — аэрозоля трибутиламина различной дисперсности. Дисперсность частиц (мкм): кривая 1 — 4–88; 2 — 187–249; 3 — 312–374; 4 — 500–562

Рис. 4. Фактор эффективности обратного рассеяния $Q_{\pi}(\lambda_i)$ полидисперсного аэрозоля трибутиламина в зависимости от относительного размера частиц (шаг расчета по ρ 50, интервал усреднения в расчетной точке $\Delta\rho = 40$) (мкм): кривая 1 – $\lambda_1 = 2,1$ ($m = 1,47 + i2 \cdot 10^{-5}$); 2 – $\lambda_2 = 2,305$ ($m = 1,47 + i8 \cdot 10^{-4}$)



тивности обратного рассеяния излучения аэрозолем трибутиламина в области составных тонов СН-связей молекулы для аэрозолей. В этой области минимальное значение $\kappa_{\min} \leq 2 \cdot 10^{-5}$, а максимальное значение на длине волны 2,305 мкм $\kappa_{\max} = 8 \cdot 10^{-4}$, и, таким образом, область составных тонов СН-связей оптимальна для диагностики грубодисперсных фракций с $\rho \approx 10^3$ ($r_{\text{эф}} \approx 300\text{--}400$ мкм).

Для получения максимального контраста (максимального отношения $Q_{\pi}(\rho)$ в случае двух длин волн) необходимо выбирать одну из длин волн зондирования в области прозрачности, а другую – в области максимального подавления внутриволновой составляющей (см. рис. 3). С целью эффективной диагностики мелкодисперсного аэрозоля необходимо выбирать линии с максимальным показателем поглощения (т. е. не в области составных тонов, как на рис. 3, а в области основных тонов).

Зависимость фактора эффективности обратного рассеяния от среднего размера частиц полидисперсного аэрозоля трибутиламина на двух длинах волн в полосах прозрачности и поглощения приведена на рис. 4. Расчетные зависимости факторов эффективности от относительного размера частиц (см. рис. 4) подтверждают правильность выбора сравнительных длин волн и позволяют получить калибровочную кривую для определения эффективного среднего радиуса аэрозоля трибутиламина, исходя из отношения факторов эффективности, определяемого по результатам двухчастотной локализации (рис. 5). Полученные данные с учетом калибровочной зависимости дают возможность определить точностные границы предлагаемого способа измерения среднего эффективного радиуса крупнодисперсных аэрозолей. При ошибке измерений отношения Q_{π} на этих длинах волн в 20 % ошибка определения среднего эффективного радиуса для фракций частиц $r_{\text{эф}} = 50\text{--}175$ мкм не превышает 40 %, а для $r_{\text{эф}} = 200\text{--}300$ мкм – 10 %.

Для эффективной диагностики мелкодисперсной фракции трибутиламина следует выбирать длины волн зондирования в области 3,3 мкм, где показатель поглощения примерно достигает значения 0,1. Следует отметить, что при выборе длин волн для дистанционной диагностики аэрозолей необходимо учитывать вероятность наложения

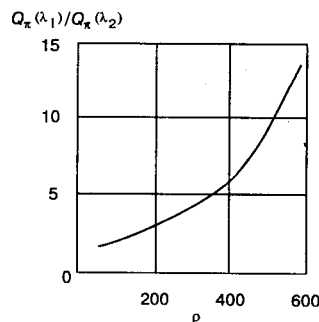


Рис. 5. Отношение факторов эффективности при двухчастотной локализации в зависимости от относительного размера частиц ($\lambda_1 = 2,1$, $\lambda_2 = 2,305$ мкм; шаг расчета по ρ 50; интервал усреднения $\Delta\rho = 40$)

спектральных резонансов обратного рассеяния, возникающих от мешающих примесей естественного и искусственного происхождения, а также принимать во внимание характеристики лазеров, включая диапазоны перестройки частоты и мощность излучения.

Эксперимент. Исследование спектральных зависимостей обратного аэрозольного рассеяния (ОАР) моделей сильнодействующих ядовитых веществ и мешающих примесей естественного и искусственного происхождения осуществлялось на автоматизированной экспериментальной установке, в которой использовались: параметрический генератор света (ПГС), криогенные (77 К) фотоприемные устройства (ФПУ) и аэрозольная камера (рис. 6).

Основные характеристики установки: рабочий спектральный диапазон 1,6–3,7 мкм; частота повторения импульсов ПГС 5–25 Гц; энергия импульса ПГС 1–15 мДж; длительность лазерного импульса 15 нс; пороговая чувствительность ФПУ $8 \cdot 10^{-8}$ Вт; полоса пропускания системы регистрации 2 МГц.

Для нахождения корректных спектральных зависимостей в ОАР принципиальное значение имеет способ получения и контроля дисперсности аэрозолей. Крупные аэрозоли веществ (50–500 мкм) создавались при помощи центробежного дискового генератора. Контроль дисперсного состава аэрозоля осуществлялся путем микрофотографирования частиц непосредственно в аэрозольном потоке в области «перетяжки» сфокусированного луча второй гармоники Nd : АИГ-лазера подсветки с частотой повторения 12,5 Гц за 10^3 – 10^4 импульсов.

По разработанной методике впервые получены спектры ОАР модельных аэрозолей сильнодействующих ядовитых веществ, воды и мешающих примесей (триэтиламин, триизобутилфосфат, турбинное масло, глицерин) раз-

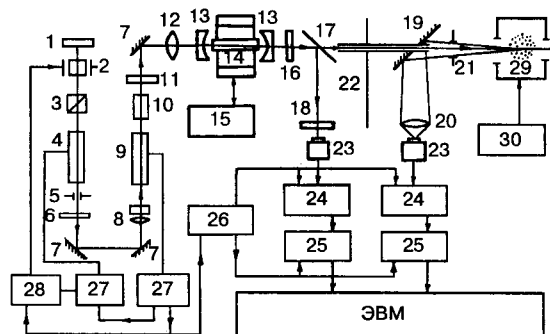


Рис. 6. Структурная схема установки для измерения спектрального хода обратного аэрозольного рассеяния: 1, 6 – зеркала резонатора Nd : АИГ-лазера; 2 – электрооптический модулятор добротности; 3 – призма Глана–Томпсона; 4, 9 – квантроны К-301; 5 – диафрагма; 7 – поворотные призмы; 8 – телескоп; 10 – удвоитель частоты (кристаллы КТР); 11 – светофильтр СЗС-21; 12 – линза, $F = 1$ м; 13 – зеркала ПГС; 14 – кристалл ниобата лития; 15 – программируемый термостат "Сromatix"; 16 – светофильтр ИКС-1; 17 – светоделительная пластина из BaF_2 ; 18 – рассеивающая пластина из BaF_2 ; 19 – поворотное зеркало; 20 – фокусирующая линза из CaF_2 , $F = 100$ мм; 21 – диафрагма; 22 – экран; 23 – ФПУ (ФД, InSb, 77 К); 24 – преобразователь напряжения В9-5; 25 – цифровые вольтметры В7-21А; 26 – генератор импульсов Г5-60; 27 – блок питания квантрона К-301; 28 – блок питания электрооптического модулятора; 29 – аэрозольная камера; 30 – система напуска и контроля параметров аэрозоля

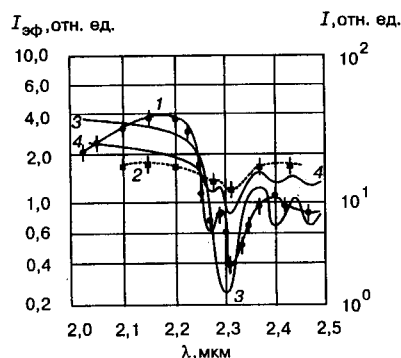


Рис. 7. Спектральные зависимости ОАР триэтиламина: I , $I_{эф}$ – интенсивность и эффективность обратного рассеяния соответственно; кривые 1, 3 – эксперимент и расчет для «крупнодисперсного» аэрозоля ($d_g = 330$ мкм); 2, 4 – эксперимент и расчет для аэрозоля «средней» дисперсности ($d_g = 90$ мкм)

личной дисперсности. Экспериментальные спектры ОАР исследованных веществ свидетельствуют о практическом совпадении положения и величин спектральных резонансов с результатами теоретических расчетов, выполненных для полидисперсных сферических частиц по формулам Ми (рис. 7, 8).

Таким образом, экспериментальные результаты подтверждают высокие аналитические возможности метода спектральных резонансов в области 2,0–2,5 мкм по селективному обнаружению аэрозолей сильнодействующих ядовитых веществ на фоне мешающих аэрозолей естественного и искусственного происхождения. Это обусловлено, с одной стороны, наличием характерных интенсивных осцилляций ОАР моделей сильнодействующих ядовитых веществ (см. рис. 2), а с другой – практическим отсутствием спектральной зависимости ОАР «мелкодисперсных» аэрозолей воды (см. рис. 3) и примесей органической природы в данном аналитическом диапазоне (в отличие от диапазонов 3–4 и 9–11 мкм).

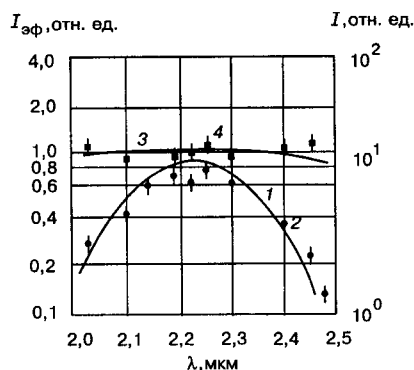


Рис. 8. Спектральные зависимости ОАР воды: кривая 1 – расчет для логарифмически нормального распределения частиц по размерам ($d_g = 190$ мкм); 2 – эксперимент для «крупнодисперсного» аэрозоля ($d = 130$ – 260 мкм); 3 – расчет для «мелкодисперсного» аэрозоля ($d_m = 7$ мкм); 4 – эксперимент для «мелкодисперсного» аэрозоля ($d = 3$ – 10 мкм)

В то же время, как показано в работе [4], при исследовании спектральных особенностей обратного рассеяния в области 2,6–3,8 мкм на линиях генерации HF (DF)-лазера фоновый водный аэрозоль в области основного тона СН-связи органических молекул может не оказывать существенного влияния на их диагностику (см. рис. 8), в то время как спектральный контраст (как показано на рис. 9 [5]) в области 3,3 мкм почти на порядок выше (как и следовало ожидать, так как $k > 10$), чем в области составного тона 2,3 мкм.

Таким образом, выбор конкретного частотного диапазона диагностики существенным образом определяется решаемой задачей и практически любое окно прозрачности атмосферы со спектральной точки зрения может оказаться оптимальным для решения определенной задачи.

Оценки показывают, что расстояние, на котором обнаруживаются облака сильнодействующих ядовитых веществ (триэтиламина) с интегральными плотностями потока аэрозолей 300 мг/м^2 ($\beta_{\pi}^{\lambda} = 10^{-5} \text{ м}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$) лидаром на основе ПГС (LiNbO_3 ; $E_{\text{имп}} = 10 \text{ мДж}$; $\tau_{\text{имп}} = 15 \text{ нс}$), приемного телескопа с эффективной площадью $0,2 \text{ м}^2$ и криогенного ИК ФПУ (ФД InAs, 77 К; $D^* = 10^{11} \text{ Вт}^{-1}/\text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2}$, $ab = 0,01 \text{ см}^2$; $\Delta f = 5 \text{ МГц}$) на длинах волн сравнения $\lambda_1 = 2,1$ и $\lambda_2 = 2,276$ мкм, может составить 3,3–6 км за один лазерный импульс в турбулентной атмосфере при дальности видимости 3–10 км с вероятностями правильного обнаружения $P_{\text{обн}} = 0,93$ и ложных тревог $P_{\text{лт}} = 3 \cdot 10^{-5}$.

Заключение. Исследованы теоретически и экспериментально спектральные особенности обратного рассеяния полидисперсных ансамблей аэрозолей сильнодействующих ядовитых веществ и мешающих примесей в области основных и составных тонов СН-связей молекул.

Предложен способ двухчастотной дистанционной диагностики средних размеров частиц аэрозольного облака на основе спектральных резонансов в обратном рассеянии, основные достоинства которого заключаются в следующем:

- 1) для определения среднего размера (интегрального содержания) частиц и материала полидисперсного аэрозоля требуются только две частоты, выбранные для конкретного вещества аэрозоля;
- 2) зондирование ведется на двух близких длинах волн, на которых для всех непоглощающих аэрозолей эффективность обратного рассеяния практически не меняется, и, следовательно, они не мешают диагностике;
- 3) снижаются требования к ошибкам измерений;
- 4) возможна диагностика размеров (интегральных содержаний) «крупнодисперсных» аэрозолей, практически недоступных для традиционных методов многочастотного зондирования.

Найден обобщенный параметр, связанный с коэффициентом поглощения вещества аэрозоля и средним размером частиц (kr) и определена область его оптимальной величины ($kr \geq 0,5$) для эффективной диагностики состава и размера аэрозоля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ивлев Л. С., Янченко Е. Л., Спажакина Н. К. Влияние микроструктуры и распределения частиц по размерам на оптические характеристики аэрозоля // Рассеяние света в атмосфере. Алма-Ата, 1972.
2. Mudd H. T., Kruger C. H., Murray E. R. Measurement of IR laser backscatter spectra from sulfuric acid and ammonium sulfate aerosols // Appl. Opt. 1982. 21, N 6. P. 1146.

3. **Ивлев Л. С., Андреев С. Д.** Оптические свойства атмосферных аэрозолей. Л.: ЛГУ, 1986.
4. **Агроскин В. Я., Васильев Г. К., Житов А. Н.** и др. Исследование спектрального хода обратного рассеяния излучения HF (DF)-лазера модельными водными аэрозолями // Журн. прикл. спектроскопии. 1989. 51, № 1.
5. **Аляев А. А., Житов А. Н., Холодных А. И.** Дистанционная диагностика аэрозолей по спектрам обратного рассеяния с использованием ПГС (3–4 мкм) // Тез. докл. IV науч.-техн. конф. «Оптические методы исследования потоков» /Под ред. Б. С. Ринкевичюса, Ю. Н. Дубнищева. М.: МЭИ, 1997. С. 168.
6. **Наац И. Э.** Теория многочастотного лазерного зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1980.
7. **Межерис Р.** Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987.
8. **Житов А. Н., Супрун И. П., Холодных А. И.** Метод дистанционного определения среднего размера частиц и состава полидисперсного аэрозоля на основе спектральных резонансов в обратном рассеянии // Тез. докл. V науч.-техн. конф. «Оптические методы исследования потоков» /Под ред. Б. С. Ринкевичюса, Ю. Н. Дубнищева. М.: МЭИ, 1999. С. 158.
9. **Борен К., Хафмен Д.** Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1986.

*Поступила в редакцию
21 декабря 1999 г.*

Реклама продукции в нашем журнале – залог Вашего успеха!