

Л.Г. Шаманова

ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ СЧЕТНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ГРУБОДИСПЕРСНОЙ ФРАКЦИИ АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ

Приведены результаты оптико-акустического зондирования счетной концентрации микронной фракции аэрозольных частиц в атмосфере.

Сравнение с микрофизической моделью аэрозольной атмосферы для Западной Сибири продемонстрировало удовлетворительное согласие полученных данных. Оценки показали, что относительная погрешность измерения счетной концентрации по предложенному методу лежит в интервале от 1,1 до 23,1 %.

Эксперименты по воздействию мощного лазерного излучения на атмосферный аэрозоль, систематизированные в [1], показали, что при плотностях лазерного излучения $Q > 6$ Дж/см² аэрозольные частицы с размерами более критического a_{cr} инициируют локальные сферические плазменные очаги, причем

$$a_{cr} \approx (\hat{A}/I)^{1/k}, \quad (1)$$

т.е. обратно пропорционален интенсивности I воздействующего лазерного излучения в диапазоне длин волн 1–10 мкм и слабо зависит от материала и формы аэрозольной частицы. Здесь \hat{A} и k – эмпирические константы, причем $\hat{A} = 2,9 \cdot 10^9$ Вт/(см·мкм^{1,5}), а коэффициент k лежит в пределах от 1 до 2. Каждая локализованная плазменная неоднородность генерирует единственный сферический звуковой импульс, форма которого воспроизводит N -волну, а суммарный акустический сигнал длинной лазерной искры представляет собой линейную суперпозицию акустических импульсов от отдельных плазменных очагов (ПО) [2].

Следовательно, количество импульсов в акустическом сигнале лазерной искры, равное числу ПО, несет информацию о счетной концентрации аэрозольных частиц размерами более критического. На данном эффекте базируется метод оптико-акустического зондирования счетной концентрации грубодисперсной фракции частиц атмосферного аэрозоля [3].

Блок-схема оптико-акустического локалятора, реализующего данный метод, показана на рис. 1. Излучение мощного импульсного СО₂-лазера 1 с помощью телескопа Кассегрена 2–5 фокусировалось на дистанцию 50–500 м в естественную атмосферу. Перестройка фокусного расстояния производилась путем подвижки гиперболического зеркала 4 вдоль оптической оси. Плотность воздействующего лазерного излучения в области каустики варьировала от 6 до 20 Дж/см², что приводило к возникновению локальных сферических плазменных очагов вблизи области каустики лазерного пучка, инициируемых аэрозольными частицами микронных размеров. Акустическое излучение искры принималось ненаправленным акустическим микрофоном 6 и регистрировалось в диапазоне звуковых частот 20 Гц–20 кГц точным импульсным шумомером 7. С усилительного выхода шумомера сигнал подавался на АЦП-10 10, фиксирующий амплитуду сигнала с частотой дискретизации 100 кГц. Запуск АЦП производился по синхроимпульсу запуска лазера 1, поступавшему на вход внешнего запуска АЦП. Для формирования паспортного импульса запуска АЦП использовался генератор Г5-54. После заполнения ОЗУ с объемом памяти 64 Кбайт, встроенного в АЦП, последующий запуск его блокировался с целью сохранения информации и выставлялся запрос на перекачку данных в микроЭВМ. Сопряжение микроЭВМ с магистралью КАМАК осуществлялось крейт-контроллером К-16 11, через который оцифрованный сигнал вводился в микроЭВМ, где по заданному алгоритму производилась обработка информации. После перекачки данных АЦП был готов к записи новой информации. Одновременно сигнал с выхода шумомера подавался на осциллограф 8 с целью его визуального контроля и записывался на магнитофон 9.

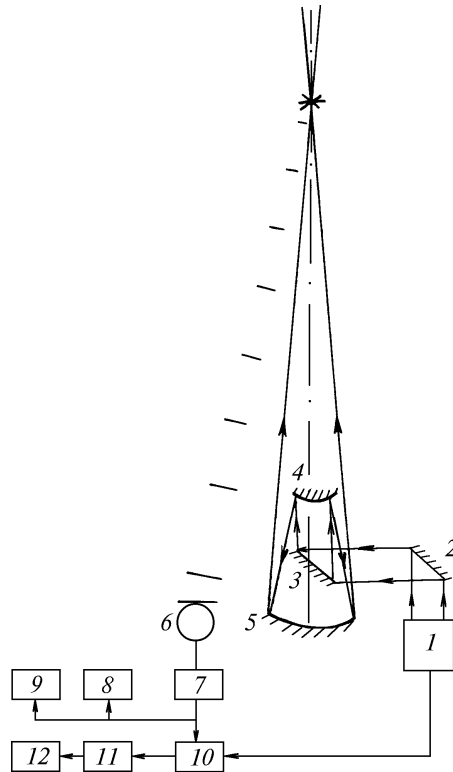


Рис. 1. Блок-схема оптико-акустического локатора: 1 – мощный импульсный CO_2 -лазер ($\lambda = 10,6$ мкм, $\tau_n = 0,3$ мкс, $E_{\text{max}} = 300$ Дж); 2–5 – фокусирующая система типа телескопа Кассегрена с диаметром большого параболического зеркала 5 50 см и малого гиперболического зеркала 4 12 см; 6 – 0,5-дюймовый ненаправленный микрофон МК-221 с предусилителем MV-201; 7 – точный импульсный шумомер PSI 00017; 8 – запоминающий осциллограф С8-17; 9 – магнитофон «Олимп»; 10 – АЦП-10; 11 – крайт-контроллер К-16; 12 – микроЭВМ «Электроника МС-0215» с цифрпечатающим устройством DZM-180 и двухкоординатным графопостроителем

Объемная концентрация аэрозольных частиц, численно равная объемной концентрации очагов пробоя, для случая узких лазерных пучков, когда поперечные размеры области пробоя меньше, чем среднее расстояние между частицами аэрозоля, инициирующими пробой, находилась из соотношения

$$N = (N_l)^3 = (K/L_{sp})^3, \quad (2)$$

где N_l – погонная концентрация очагов пробоя; L_{sp} – длина лазерной искры; K – общее число ПО, рассчитываемое на ЭВМ по количеству положительных импульсов в принятом сигнале, амплитуда которых превышает пороговый уровень $U_{th} = 2U_N$. Здесь U_N – среднеквадратичный уровень шумового сигнала, измеряемый в отсутствие лазерного излучения на трассе.

Для широких лазерных пучков область пробоя аппроксимируется цилиндром, и

$$N = \frac{K}{\pi L_{sp} a_c^2}, \quad (3)$$

где a_c – радиус пучка в области перетяжки. Длина лазерной искры рассчитывалась в зависимости от геометрии расположения приемного микрофона.

Для приведенного на рис. 1 оптико-акустического локатора акустическое излучение принималось под углом $\theta \approx 180^\circ$ к направлению посылки лазерного, и

$$L_{sp} = c \tau_{sp} = c (t_2 - t_1). \quad (4)$$

Здесь c – скорость звука в воздухе; τ_{sp} – суммарная длительность акустического сигнала лазерной искры, определяемая по разности времен прихода сигналов от наиболее удаленного и ближайшего ПО; $t = 0$ соответствует моменту посылки лазерного излучения.

При $\theta = 90^\circ$, когда приемный микрофон располагался под каустикой лазерного пучка,

$$L_{sp} = 2\sqrt{c \tau_{sp} (2R + c \tau_{sp})}, \quad (5)$$

где $R = ct_1$ – расстояние от оси пучка до приемного микрофона.



Рис. 2. Панорамные фотографии лазерной искры, полученной при фокусировке лазерного излучения на дистанцию $F = 120$ м в атмосферу. Площадь фокального пятна $S = 10$ (а, б) и 3 см^2 (в). Плотность лазерной энергии в области каустики $Q = 18$ (а), 8 (б), и 6 Дж/см² (в). Поле зрения объектива фотоаппарата «Зенит» составило $34,5^\circ$

Измерения проводились на территории Института оптики атмосферы СО РАН в вечернее и ночное время. Трасса проходила между зданиями, на высоте 5–7 м над поверхностью земли. Приемный микрофон располагался под областью каустики, на различных расстояниях от оси пучка, от нескольких сантиметров до нескольких десятков сантиметров. На рис. 2 показаны панорамные фотографии лазерной искры, полученные при фокусировке широкого (рис. 2, а, б) и узкого (рис. 2, в) лазерных пучков на дистанцию 120 м. Суммарное число ПО, рассчитанное по фотографии, составило 67 для второй реализации и 14 для третьей, что совпало с количеством импульсов, рассчитанным по временной развертке акустических сигналов, показанной на рис. 3 для второй и третьей реализации.

При этом для второй реализации $t_1 = 1,2$ мс, $t_2 = 39,4$ мс, $\tau_{sp} = 38,2$ мс и из соотношения (5) $L_{sp} = 26,1$ м. С учетом того, что $S = \pi a_c^2 = 10 \text{ см}^2$, из формулы (3) получим $N = 2567,1 \text{ м}^{-3}$. Для третьей реализации $t_1 = 0,12$ мс, $\tau_{sp} = 3,56$ мс, и из формулы (4) $L_{sp} = 1,18$ м. Тогда из формулы (2) получаем $N = 1669,9 \text{ м}^{-3}$.

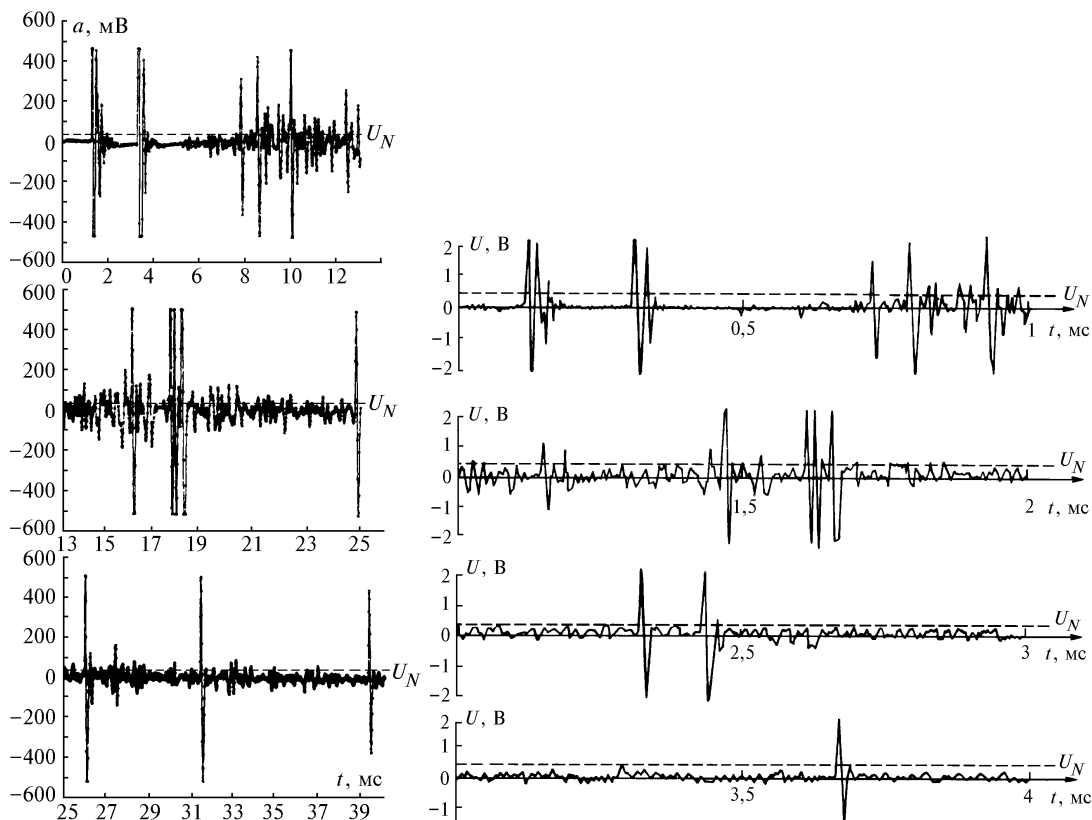


Рис. 3. Временная развертка акустического сигнала для реализаций лазерной искры, представленных на рис. 2, б и в. По оси ординат отложен электрический аналог амплитуды звукового давления. Приемный акустический микрофон располагался на расстоянии $R = 0,004$ (б) и $0,4$ м (а) от области каустики лазерного пучка. Временная развертка (б) построена двухкоординатным графопостроителем. Развертка (а) получена в результате машинной обработки оцифрованного сигнала. С целью уменьшения уровня шумового сигнала, который в условиях измерений определялся шумом ветра, приемный микрофон при регистрации акустического сигнала, показанного на рис. 3,а, помещался в специально оборудованной палатке

Вторая серия измерений проводилась на атмосферно-оптическом полигоне Института оптики атмосферы СО РАН. Трасса измерений проходила на высоте 2–2,5 м над однородной подстилающей поверхностью. Излучение мощного импульсного CO_2 -лазера ($\lambda = 10,6$ мкм, $\tau_l = 1$ мкс, $E_{\max} = 2$ кДж) фокусировалось в атмосферу на дистанцию 500 м. Приемный микрофон помещался под область каустики на расстоянии 0,5 м от оси пучка. Результаты измерений приведены в таблице.

Результат оптико-акустических измерений счетной концентрации грубодисперсной фракции атмосферного аэрозоля в зависимости от плотности воздействующего лазерного излучения

$Q, \text{Дж/см}^2$	5,8	6,7	7,9	18,8
$N, \text{м}^{-3}$	474	3483	4251,5	4895

Наблюдаемое увеличение N с ростом плотности воздействующей лазерной энергии, замечаемой на выходе из фокусирующей системы, объясняется уменьшением критического размера аэрозольных частиц, инициирующих плазменные очаги. Так, по данным [4], для $Q = 5,8 \text{ Дж/см}^2$ $2a_{cr}$ превышает 10 мкм, а для $Q = 18,8 \text{ Дж/см}^2$ $2a_{cr} \sim 7,5$ мкм. Полученные результаты согласуются с микрофизической моделью аэрозольной атмосферы для Западной Сибири [5], в соответствии с которой средняя приземная концентрация аэрозольных частиц размером от 7 до 10 мкм составляет $N_{\text{mod}} = 6000 \text{ м}^{-3}$, при этом величина относительного отклонения $\delta N = [(N - N_{\text{mod}})/N_{\text{mod}}] \cdot 100\%$ составляет 18,4 %.

Расчетную оценку абсолютной погрешности измерения объемной концентрации аэрозольных частиц микронных размеров по предложенному методу можно записать в следующем виде:

$$\Delta N = \sqrt{\left(\frac{\partial N}{\partial K} \Delta K\right)^2 + \left(\frac{\partial N}{\partial c} \Delta c\right)^2 + \left(\frac{\partial N}{\partial \tau_{sp}} \Delta \tau_{sp}\right)^2}, \quad (6)$$

где ΔK , Δc и $\Delta \tau_{sp}$ – абсолютные погрешности измерения количества импульсов, скорости звука и длительности акустического сигнала искры.

Из формул (2) и (4) имеем

$$\frac{\partial N}{\partial K} \Delta K = 3 \left(\frac{K}{c \tau_{sp}}\right)^2 \frac{\Delta K}{c \tau_{sp}}, \quad \frac{\partial N}{\partial c} \Delta c = 3 \left(\frac{K}{c \tau_{sp}}\right)^2 \frac{K \Delta c}{c^2 \tau_{sp}}, \quad \frac{\partial N}{\partial \tau_{sp}} \Delta \tau_{sp} = 3 \left(\frac{K}{c \tau_{sp}}\right)^2 \frac{K \Delta \tau_{sp}}{c \tau_{sp}} \quad (7)$$

и для относительной погрешности измерения концентрации получаем

$$\delta N = \sqrt{\left(\frac{\Delta N}{N}\right)^2} = 3 \sqrt{\delta^2 K + \delta^2 c + \delta^2 \tau_{sp}}, \quad (8)$$

где $\delta K = \Delta K/K$, $\delta c = \Delta c/c$, $\delta \tau_{sp} = \Delta \tau_{sp}/\tau_{sp}$ – относительные погрешности измерения количества импульсов, скорости звука и длительности акустического сигнала искры.

Проанализируем каждое слагаемое в формуле (8). Предположим, что случайные расстояния между частицами аэрозоля, инициирующими ПО, распределены по пуассоновскому закону. Тогда для безразмерных параметров $L_0 = L/r$ и $n_0 = n/r$, где L – среднее расстояние между ПО; r – средний радиус ПО и n – расстояние между ПО в конкретной реализации случайного процесса, имеем

$$P(n_0) = \frac{L_0^{n_0}}{n_0!} e^{-L_0}. \quad (9)$$

Два ПО будут неразличимы, если $n_0 = 1$. Средняя концентрация аэрозольных частиц микронных размеров у поверхности земли, в соответствии с микрофизической моделью аэрозольной атмосферы Западной Сибири [5], составляет $N_{cp} = 1,069 \text{ см}^{-3}$, что дает $L = 0,97 \text{ см}$.

По данным [6], $r = 0,1-0,25 \text{ см}$, откуда $L_0 = 3,9-9,7$. Подставив эти значения в формулу (9), получим

$$P(1) = \delta K = 0,0006-0,079. \quad (10)$$

Скорость звука связана известной зависимостью с температурой атмосферного воздуха

$$c = 20,05 \sqrt{T}, \quad (11)$$

где T измеряется в кельвинах. Отсюда

$$\Delta c = \frac{\partial c}{\partial T} \Delta T = \frac{20,05 \Delta T}{2 \sqrt{T}}, \quad (12)$$

где ΔT – абсолютная погрешность измерения температуры, и

$$\delta c = \frac{1}{2} \delta T. \quad (13)$$

Полагая $\Delta T = 1 \text{ К}$, получим

$$\delta c = 0,0037. \quad (14)$$

Для используемой частоты дискретизации сигнала 100 кГц $\Delta \tau_{sp} = 10^{-5} \text{ с}$, что при $\tau_{sp} = 4-40 \text{ мс}$ дает

$$\delta \tau_{sp} = 0,00025 - 0,0025. \quad (15)$$

Подставляя значения относительных погрешностей измерения из соотношений (10), (14) и (15) в формулу (8), получим

$$\delta N = 0,0112 - 0,2313, \quad (16)$$

т.е. суммарная относительная погрешность измерения концентрации по предложенному методу лежит в интервале от 1,1 до 23,1 %.

В заключение следует отметить, что предложенный оптико-акустический метод измерения счетной концентрации микронной фракции аэрозольных частиц обеспечивает возможность измерения в любое время суток. Максимальная дальность зондирования, реализованная к настоящему времени, составляет 500 м и ограничивается возможностями создания дистанционной лазерной искры. При этом, по нашим оценкам, при слабом ветре возможен уверенный прием акустического сигнала при удалении приемного микрофона более чем на 1 км. В условиях сильного ветра необходимо использовать защищенные от ветра микрофоны, помещенные в сетчатый металлический кожух, или устанавливать их в специально оборудованной палатке.

Дополнительным преимуществом предложенного метода является возможность параллельной работы со спектрохимическим лидаром [2], анализирующим химический состав аэрозолей по эмиссионному спектру лазерной искры, что позволяет получать качественно новую информацию об атмосфере при минимальных дополнительных затратах.

Автор благодарит А.П. Годлевского и Ю.Д. Копытина за проведение экспериментов по созданию лазерной искры, а также В.П. Муравского за участие в эксперименте.

1. Копытин Ю.Д., Протасевич Е.Т., Чистякова Л.К., Шишковский В.И. // Воздействие лазерного и ВЧ-излучений на воздушную среду. Новосибирск: Наука, 1992. 189 с.
2. Шаманаева Л.Г. Разработка и исследование возможностей дистанционных методов зондирования параметров атмосферы с использованием оптического и акустического излучений: Дис... канд. физ.-мат. наук. Томск, 1983. 129 с.
3. Шаманаева Л.Г. Оптико-акустическое зондирование крупной фракции атмосферного аэрозоля // Исследование пограничного слоя атмосферы над сушей и океаном акустическими методами. Ч. 2. М.: Академия наук СССР, 1990. С. 20–25.
4. Ахтырченко Ю.В., Бочкарев Н.Н., Высоцкий Ю.П. и др. // 8-й Всесоюзный симпозиум по лазерному и акустическому зондированию атмосферы: Тезисы докл. Ч. 2. Томск: ТФ СО АН СССР, 1984. С. 114–118.
5. Белан Б.Д., Гришин А.И., Матвиенко Г.Г., Самохвалов И.В. // Пространственная изменчивость характеристик атмосферного аэрозоля. М.: Наука, 1989. С. 126–127.
6. Копытин Ю.Д., Сорокин Ю.М., Скрипкин А.М., Белов Н.Н., Букатый В.И. Оптический разряд в аэрозолях. Новосибирск: Наука, 1990. 69 с.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
15 июля 1996 г.

L. G. Shamaeva. Optoacoustic Sounding of Number Density of Coarse Fraction of the Atmospheric Aerosol.

Results of optoacoustic sounding of number density of aerosol particles in the atmosphere are presented. A comparison of the data obtained here with microphysical model of the aerosol atmosphere for Western Siberia demonstrates their satisfactory agreement.

The estimates show the relative error of the number density measurement by the proposed method is within the range from 1,1 to 23,1%.