

УДК 621.373:772.99

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ АТМОСФЕРЫ ЗОНЫ ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ

Л. О. Черногор

Доктор физико-математических наук, профессор
Факультет радиофизики
Харьковский национальный университет
им. В.Н. Каразина
пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61077
Контактный тел.: (057) 707-55-61
E-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua

А. С. Рашкевич

Адъюнкт
Кафедра охраны труда и техногенно-экологической
безопасности
Национальный университет гражданской защиты
Украины
ул. Чернышевского, 94, г. Харьков, 61023
Контактный тел.: (057) 707-34-57
E-mail: acmilan_1899@mail.ru

Аналіз теоретичних основ лазерних вимірювань складу повітряного середовища та можливості його застосування в надзвичайних ситуаціях (НС). Запропоновано метод розв'язання задачі оперативного моніторингу складу газів домішок і аерозолів в зоні НС застосуванням єдиного комплексу лазерної вимірювальної апаратури

Ключові слова: лазер, атмосфера, оперативний моніторинг

Анализ теоретических основ лазерных измерений состава воздушной среды и возможности его применения в чрезвычайных ситуациях (ЧС). Предложен метод решения задачи оперативного мониторинга состава газов примесей и аэрозолей в зоне ЧС применением единого комплекса лазерной измерительной аппаратуры

Ключевые слова: лазер, атмосфера, оперативный мониторинг

Analysis of the theoretical foundations of laser measurements of air pollution and its application in emergency situations (ES). We propose a method for solving the real-time monitoring of trace gases and aerosols in the emergency area using a single set of laser measuring devices

Key words: laser, atmosphere, real-time monitoring

Постановка проблемы

Стремительное развитие всех отраслей промышленности, энергетики, транспорта, увеличение численности населения, урбанизация и химизация всех сред деятельности человека приводят к нарушению и загрязнению биосферы, ее отдельных компонентов. Экологическая ситуация, сложившаяся в ряде промышленных центров, в районах добычи и переработки минерального сырья, строительства и эксплуатации промышленных объектов, часто близка к критической [1].

Осознание глобальной экологической катастрофы заставляет мировое сообщество искать пути выхода из кризисной ситуации. Вывод о необходимости перехода цивилизации к экологически сбалансированному развитию имеет непосредственное отношение к опасности, угрожающей человеческой цивилизации. Идея глобального мониторинга окружающей человека природной среды была выдвинута в 1972 г. на Стокгольмской конференции и нашла отклик в документах Конференции ООН в Рио-де-Жанейро (1992) [2,3].

Основной задачей экологического мониторинга является изучение изменений природной среды, возникающих в результате воздействия на нее человека,

получение как качественных, так и количественных характеристик изменений в природной среде.

Анализ последних исследований и публикаций

Наиболее перспективным методом диагностики загрязнений воздуха является дистанционные методы зондирования.

Среди дистанционных методов особое место занимают лазерные методы [4]. Одним из самых эффективных средств дистанционного мониторинга степени загрязнения окружающей среды являются лазерные мониторы, называемые также лидарами (по аналогии с радарами).

Основы лазерного мониторинга окружающей среды заложены в работах [4–6]. Их обобщение проведено в работах [7,8].

Суть методики кратко состоит в следующем.

Загрязненная атмосфера содержит не присущие ей газы (двуокись серы – SO_2 , окислы азота – NO и NO_2 , углеводороды – H_xC_x и другие), продукты их реакции типа кислот и окислителей, а также твердые пылинки с размерами от 10^{-8} до 10^{-3} м (аэрозоли).

Молекулы газов – загрязнителей и аэрозолей поглощают и рассеивают лазерное излучение. На этом

базируются методы лазерного мониторинга загрязнений в атмосфере.

Цель экологического мониторинга – информационное обеспечение управления природоохранной деятельностью и экологической безопасностью.

Для достижения поставленной цели необходимо дать ответы на следующие вопросы:

- каково состояние природной среды в рассматриваемый отрезок времени в сравнении с предшествующим техногенезу состоянием (в относительной или абсолютной форме) и какие изменения (положительные, отрицательные) ожидаются в природной среде в прогнозируемый отрезок времени;
- в чем причины происшедших изменений и возможных изменений в будущем (в том числе нежелательных, губительных, критических) и что явилось, является или будет являться источником этих изменений (как правило, вредных техногенных воздействий);
- какие воздействия на данную локальную природную среду, определяемые исходя из выработанной для данного случая критериальной основы оценок функции полезности – вредности, являются вредными (нежелательными или недопустимыми);
- какой уровень техногенных воздействий, в том числе в совокупности с естественными или стихийными процессами и воздействиями, происходящими в рассматриваемой природной среде, является допустимым для природной среды и отдельных ее компонентов или комплексов (ценозов) и какие резервы имеются у природной среды для саморегенерации состояния, адекватного исходному, принятому за состояние экологического баланса;
- какой уровень техногенных воздействий на природную среду, отдельные ее компоненты и комплексы является недопустимым или критическим, после которого восстановление природной среды до уровня экологического баланса является неосуществимым.

Прикладная задачи и ее решение

Состав выбросов вредных веществ зависит от материалов, находящихся в зоне взрыва и горения. Этот состав априори неизвестен.

При горении нефти, бензина, природного газа основной состав продуктов горения хорошо известен. В него входит CO, CO₂, H₂O, SO, SO₂ и др.

Пожары сопровождаются горением сопутствующих материалов. Состав выбросов при этом может быть самым различным.

Одновременно с выбросами газов в зонах горения образуется аэрозоли, т.е. твердые несгоревшие частицы вещества с характерным размером от 10⁻⁸ до 10⁻³ м. Их состав и концентрация также априори неизвестны.

Несвойственные атмосфере вредные выбросы газов и аэрозолей угрожают жизни и здоровью людей: работникам производств, где возникла зона ЧС, жителям близлежащих районов, а также ликвидаторам ЧС.

Для уменьшения риска и угрозы людям требуется оперативный и достаточно точный мониторинг загрязнений в зоне ЧС.

В данной работе будут рассмотрены теоретические основы лазерного мониторинга атмосферы зоны чрезвычайной ситуации.

Основное уравнение лазерной локации. Исходные соотношения

Основным уравнением лазерной локации будем называть зависимость мощности отраженного (рассеянного) объектом зондирования излучения на заданной длине волны от расстояния до объекта и его параметров [9].

Уравнение может быть приведено к такому виду:

$$P_s = \frac{PS\eta\beta}{R^2} e^{-2}, \quad (1)$$

где P_s – мощность отраженного (рассеянного) излучения,

P – мощность лазера,

S – эффективная площадь (апертура) приемного элемента,

η – его эффективность,

β – объемный коэффициент обратного рассеяния падающего излучения,

$\Gamma = \int_0^R \alpha(R) dR$ – интегральный коэффициент поглощения лазерного излучения,

α – объемный коэффициент поглощения лазерного излучения,

R – расстояние до объекта зондирования.

В случае импульсного зондирования:

$$R = c\tau/2,$$

где c – скорость света,

τ – задержка импульса при его движении от передающего объекта и от него до приемного устройства.

При использовании в качестве отражателя зондирующего пучка уголкового отражателя уравнение (1) модифицируется к виду:

$$P_s = \frac{PS\eta C}{R_0^2} e^{-2\Gamma(R_0)}, \quad (2)$$

где C – аппаратная константа,

R_0 – длина трассы,

$\Gamma(R_0)$ – интегральный коэффициент поглощения при прохождении излучением всей трассы.

В уравнениях (1) и (2) зависит от α , β в свою очередь:

$$\alpha = \alpha_m + \alpha_a,$$

где α_m и α_a – коэффициенты, описывающие молекулярное и аэрозольное ослабления.

Ослабление лазерного излучения вследствие молекулярного рассеяния

Для α_m имеем следующее соотношение:

$$\alpha_m = \frac{3}{8\pi} \beta_m, \tag{4}$$

где β_m – коэффициент молекулярного рассеяния. Он дается формулой Рэлея [10]:

$$\beta_m = \frac{8}{3} \pi^3 \frac{(n^2 - 1)^2}{N \lambda^4} \frac{6 + 3\delta}{6 - 7\delta}, \tag{5}$$

где n – показатель преломления воздуха, δ – степень деполяризации рассеянного излучения. Для его описания преобразуем множитель в (5):

$$A_\delta = \frac{6 + 3\delta}{6 - 7\delta} = \frac{1 + 3\delta/6}{1 - 7\delta/6}.$$

Поскольку значение δ при однократном молекулярном рассеянии принимается в пределах 0 – 9,7% (табл. 1). Тогда с учетом того, что $\delta \ll 1$

$$A_\delta = 1 + \frac{3\delta}{6} + \frac{7\delta}{6} = 1 + \frac{5}{3} \delta.$$

Значение A_δ отличается от 1 на $5\delta/3$, т.е. не более, чем на 16%. Поэтому часто полагают $A_\delta \approx 1$. Из (4) и (5) следует, что:

$$\alpha_m = \pi^2 \frac{(n^2 - 1)^2}{N \lambda^4} \frac{6 + 3\delta}{6 - 7\delta}. \tag{5a}$$

При $n^2 - 1 \ll 1$ или то же самое при $n \approx 1$ представим в скобках в следующем виде

$$n^2 - 1 = (n - 1)(n + 1) \approx 2(n - 1).$$

Тогда из (5a) имеем:

$$\alpha_m \approx 4\pi^2 \frac{(n^2 - 1)^2}{N \lambda^4}.$$

Ослабление лазерного излучения вследствие аэрозольного рассеяния

Выражение для α_a следует из теории аэрозольного рассеяния (теории Ми) [10, 11].

Однако более удобное для описания аэрозольного ослабления является эмпирическое соотношение [8]:

$$\alpha_a = \frac{3.912}{R_m} \left(\frac{\lambda}{0.55} \right)^{-q},$$

где α_a – измеряется в км^{-1} , λ – измеряется в км, R_m – метеорологическая дальность видимости в км при $\lambda = 0.55$ мкм, q – показатель степени, который, вообще говоря, зависит от R_m .

При этом

$$\Gamma_a = \int_0^R \alpha_a dR.$$

Так, при $R_m \leq 6$ км [8]:

$$q = 0.585 R_m^{1/3},$$

где R_m измеряется в км.

Для R_m , изменяющихся в пределах 6–50 км $q \approx 1.3$.

При $R_m \geq 50$ км $q \approx 1.6$ [8].

Значение R_m для различных условий видимости приведен в табл. 2. Результаты расчета q , α_a и $\Gamma_a(R_m)$ для различных R_m приведена в табл. 3. Из табл. 3 видно, значение α_a существенно уменьшается при улучшении видимости, в то же время значения $\Gamma_a(R_m)$ при увеличивающихся R_m остаются неизменными и равными $3.9 \cdot 10^{-3}$. Иначе говоря, при $R = R_m$ поглощается около 0.78% мощности видимого излучения.

Таблица 1

Степень деполяризации основных атмосферных газов и примесей [8]

Газ	$\delta, \%$
Воздух	3.5
H ₂ O	2
N ₂	3.6
O ₂	6.5
CO ₂	9.7
SO ₂	3.1
H ₂ S	0.3
CH ₄	0
Cl ₂	4.1
HCl ₂	0.7
CO	1.3
C _n H _{2n+2}	0

Таблица 2

Значения метеорологической видимости при длине волны $\lambda = 5.5 \cdot 10^{-7}$ м [8]

Условия видимости	R_m
Плотный туман	3–5 м
Густой туман	5–50 м
Средний туман	50–500 м
Легкий туман	0,5–1 км
Слабый туман	1–2 км
Дымка	2–4 км
Легкая дымка	4–10 км
Ясно	10–20 км

Таблица 3

Расчитанные значения q , α_a и $\Gamma_a(R_m)$ при различных R_m и $\lambda = 5.5 \cdot 10^{-7}$ м

Условия в зоне ЧС	$R_m, \text{ м}$	q	$\alpha_a, \text{ м}^{-1}$	$\Gamma_a(R_m)$
Видимость очень плохая	1	0.059	$3.9 \cdot 10^{-3}$	$3.9 \cdot 10^{-3}$
Видимость плохая	5	0.100	$0.8 \cdot 10^{-3}$	$3.9 \cdot 10^{-3}$
Видимость средняя	10	0.126	$3.9 \cdot 10^{-4}$	$3.9 \cdot 10^{-3}$
Видимость удовлетворительная	30	0.182	$1.3 \cdot 10^{-4}$	$3.9 \cdot 10^{-3}$
Видимость хорошая	50	0.216	$0.8 \cdot 10^{-4}$	$3.9 \cdot 10^{-3}$
Видимость отличная	1000	0.585	$3.9 \cdot 10^{-6}$	$3.9 \cdot 10^{-3}$

Проведем расчеты α_a и $\Gamma_a(R_m)$ для CO_2 - и CO -лазеров, которые планируется использовать для экспериментальных исследований. Как известно, для них диапазон длин волн составляет 11.7–13 мкм и 5–6 мкм соответственно [8].

Результаты расчетов приведены в табл. 4. Считалось, что для этих лазеров в среднем $\lambda_1 = 12.3$ мкм и $\lambda_2 = 5.5$ мкм.

Таблица 4

Значения α_a и $\Gamma_a(R_m)$ для CO_2 - и CO -лазеров

Условия в зоне ЧС	R_m , м	η	$\alpha_a(\lambda_1)$, м ⁻¹	$\alpha_a(\lambda_2)$, м ⁻¹	$\Gamma_a(\lambda_1)$	$\Gamma_a(\lambda_2)$
Видимость очень плохая	1	0.059	$3.25 \cdot 10^{-3}$	$3.40 \cdot 10^{-3}$	$3.25 \cdot 10^{-3}$	$3.40 \cdot 10^{-3}$
Видимость плохая	5	0.100	$5.73 \cdot 10^{-4}$	$6.21 \cdot 10^{-4}$	$2.86 \cdot 10^{-3}$	$3.11 \cdot 10^{-3}$
Видимость средняя	10	0.126	$2.64 \cdot 10^{-4}$	$2.92 \cdot 10^{-4}$	$2.64 \cdot 10^{-3}$	$2.92 \cdot 10^{-3}$
Видимость удовлетворительная	30	0.182	$7.41 \cdot 10^{-5}$	$8.58 \cdot 10^{-5}$	$2.22 \cdot 10^{-3}$	$2.57 \cdot 10^{-3}$
Видимость хорошая	50	0.216	$4.0 \cdot 10^{-5}$	$4.76 \cdot 10^{-5}$	$2.00 \cdot 10^{-3}$	$2.38 \cdot 10^{-3}$
Видимость отличная	1000	0.585	$6.4 \cdot 10^{-7}$	$1.01 \cdot 10^{-6}$	$0.64 \cdot 10^{-3}$	$1.01 \cdot 10^{-3}$

Из табл. 4 видно, что ослабление лазерного излучения аэрозолями – относительно небольшое на расстоянии R_m . Оценим максимальный размер зоны ЧС, считая, что аэрозоли ослабляют мощность лазерного излучения в 10 раз.

При этом

$$e^{2\Gamma_{max}} = 10.$$

Отсюда

$$\Gamma_{a_{max}} = \frac{1}{2} \ln 10 \approx 1.15.$$

Тогда

$$R_{a_{max}} = \frac{1.15}{\alpha_a(\lambda)}. \tag{56}$$

Результаты расчета $R_{a_{max}}$ приведены в табл. 5.

Из табл. 5 видно, максимальные размеры зоны ЧС, подлежащей диагностике, в условиях очень плохой и плохой видимости ограничиваются сотнями метров – одним (двумя) километрами.

При лучшей видимости главную роль уже играет не ослабление аэрозолями, а мощность лазера и удаление до зоны ЧС.

Таблица 5

Результаты расчета максимальных размеров зоны ЧС для CO_2 - и CO -лазеров

Условия в зоне ЧС	$R_{max}(\lambda_1)$, км	$R_{max}(\lambda_2)$, км
Видимость очень плохая	0.354	0.338
Видимость плохая	1.75	1.61
Видимость средняя	3.79	3.42
Видимость удовлетворительная	13.5	11.65
Видимость хорошая	25	21.0
Видимость отличная	1560	1000

Заметим, что R_m описывает видимость в видимом диапазоне волн. Значения R_m изменяются от 1 до 1000 м. В то же время значения $R_{max}(\lambda_1)$ изменяется в пределах: 354–1750 км, а $R_{max}(\lambda_2)$ – в пределах: 0.338–1.619 км. Отсюда следует исключительно важный для служб МЧС вывод.

В условиях визуальной невидимости (“слепоты”) лазеры на CO_2 и CO позволяют производить дистанционную диагностику загрязнений зон ЧС с размерами от 340 до 1750 м. При очень крупных авариях зоны ЧС могут достигать таких размеров.

Примером подобной аварии, точнее катастрофы, были взрывы военных складов вблизи г. Мелитополя в мае 2004 г.

Метод дифференциального поглощения. Однородное распределение загрязнений в атмосферном газе

Обратимся к уравнению (2). В этом уравнении только Γ зависит от длины волны λ (частоты ν) электромагнитного излучения. Для исключения неизвестных (или известных, но с большей погрешностью) величин измерения следует вести на двух длинах волн $\lambda_{1,2}$ (двух частотах $\nu_{1,2}$). Одна из длин волн должна соответствовать максимуму в спектре поглощения, а вторая – должна быть вне этого спектра. Представим уравнение (2) в виде:

$$P_s(\lambda) = B e^{-2\Gamma(\lambda)}, \tag{6}$$

где $B = \frac{P S \eta C}{R_0^2}$.

Тогда из (6) имеем:

$$\ln P_s(\lambda) = \ln B - 2\Gamma(\lambda). \tag{7}$$

При измерении на двух длинах волн для каждой составляющей, загрязняющей атмосферу, получим:

$$\ln P_s(\lambda_1) = \ln B - 2\Gamma(\lambda_1), \tag{8}$$

$$\ln P_s(\lambda_2) = \ln B - 2\Gamma(\lambda_2). \tag{9}$$

После вычитания (5) из (8) имеем:

$$\Gamma(\lambda_1) - \Gamma(\lambda_2) = \frac{1}{2} \ln \frac{P_s(\lambda_1)}{P_s(\lambda_2)}. \tag{10}$$

Учтем, что:

$$\Gamma(\lambda_{1,2}) = \int_0^{R_0} N(R)\sigma(R, \lambda_{1,2}) dR. \tag{11}$$

Важно, что интегрирование в (11) ведется вдоль трассы.

При однородном распределении атмосферных примесей:

$$\Gamma(\lambda_{1,2}) = N\sigma(\lambda_{1,2})R_0. \tag{12}$$

Если размер облака выбросов $l \ll R_0$, то:

$$\Gamma(\lambda_{1,2}) = N\sigma(\lambda_{1,2})l. \tag{13}$$

В соотношениях (12), (13) N – искомая концентрация примесей.

Из (12) следует, что:

$$\Delta\Gamma = \Gamma(\lambda_2) - \Gamma(\lambda_1) = N(\sigma(\lambda_2) - \sigma(\lambda_1))R_0$$

или
$$\Delta\Gamma = N\Delta\sigma R_0, \tag{14}$$

где $\Delta\sigma = \sigma(\lambda_2) - \sigma(\lambda_1)$.

С другой стороны, из (10) следует, что:

$$\Delta\Gamma = \frac{1}{2} \ln \frac{P_s(\lambda_1)}{P_s(\lambda_2)}. \tag{15}$$

Тогда из (14), (15) получаем:

$$N = (2\Delta\sigma R_0)^{-1} \ln \frac{P_s(\lambda_1)}{P_s(\lambda_2)}. \tag{16}$$

Аналогично из (13) и (14) следует, что:

$$N = (2\Delta\sigma l)^{-1} \ln \frac{P_s(\lambda_1)}{P_s(\lambda_2)}. \tag{17}$$

Для нахождения учтем, что зависимость $\sigma(\lambda)$ или $\sigma(v)$ описывается лоренцевой кривой, т.е.:

$$\sigma(v) = \sigma(v_L) \frac{v_L^2}{v_L^2 + (v - v_0)^2}, \tag{18}$$

где v_0 – центральная частота,

v – текущее значение частоты,

v_L – лоренцева частота.

Тогда:

$$\Delta\sigma = \frac{d\sigma}{d\lambda} \Delta\lambda = \frac{d\sigma}{dv} \Delta v, \tag{19}$$

где $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$, $\Delta v = v_1 - v_2$.

Неоднородное распределение загрязнений в атмосферном газе

В этом случае для нахождения N вдоль лазерного луча необходимо решать уравнение (11).

Уравнение (11) – интегральное уравнение Вольтерры. Для решения этого уравнения необходимо и правую часть в (11) проинтегрировать по верхнему пределу R_0 . Тогда решение (11) примет вид:

$$N(R_0) = \sigma(\lambda_1, \lambda_2)^{-1} \frac{d\Gamma(R_0, \lambda_1, \lambda_2)}{dR_0}. \tag{20}$$

Из (15) и (20) следует, что:

$$N(R_0) = (2\Delta\sigma)^{-1} \frac{d}{dR_0} \ln \frac{P_s(\lambda_1)}{P_s(\lambda_2)}. \tag{21}$$

Соотношение (21) дает значение концентрации примесей на расстоянии R_0 .

На практике при нахождении решения (21) возникает трудность, связанная с численным дифференцированием, которое приводит к неустойчивости (случайным колебаниям) искомой величины $N(R_0)$.

Бороться с этой трудностью можно применением регуляризации по Тихонову. Для этой цели разработаны специальные регуляризующие алгоритмы [12].

Выводы

Дистанционный лазерный мониторинг позволяет решить при помощи одного комплекта аппаратуры двуединую задачу – оперативного мониторинга как газовых примесей, так и аэрозолей в зоне ЧС.

Литература

1. Беккер А.А. Охрана и контроль загрязнения природной среды. – Гидрометеиздат, 1989.
2. Стокгольмская конференция по окружающей среде 1972 года.
3. Конференция ООН по окружающей среде и развитию в Рио-де-Жанейро 1992 года.
4. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. – М.: Мир, 1979.
5. Лазерный контроль атмосферы. под редакцией Э.Д. Хинкли. М.: Мир, 1979. 386 с.
6. В.Е. Зуев, В.В. Зуев. Дистанционное оптическое зондирование атмосферы. С.–П.: Гидрометеиздат, 1992. 212 с.
7. P.L. Meyer, M.W. Sigrist. Atmospheric pollution using CO₂ laser photoacoustic spectroscopy and other techniques. *Rov. Sci. Instrum.*, 1990, v. 61, № 7, pp. 1779–1807.
8. Б.И. Васильев, У.М. Маннун. ИК лидары дифференциального поглощения для экологического мониторинга окружающей среды. *Квантовая электроника*, 2006, т. 36, № 9, с. 801–820.
9. Л.Ф. Черногор. Дистанционное радиозондирование атмосферы и космоса. Х.: ХНУ имени В.Н. Каразина, 2009. 348 с.
10. А. Исимацу. Распространение и рассеяние волн в случайно – неоднородных средах. Т. 1. Однократное рассеяние и теория переноса. М.: Мир, 1981. 281 с.
11. Л.С. Ивлев, С.О. Андреев. Оптические свойства аэрозолей. Л.: ЛГУ, 1986. 278 с.
12. А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 288 с.