

*Третьяков О.В., канд. техн. наук, доц., НУГЗУ,
Рашкевич А.С., адъюнкт, НУГЗУ*

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛАЗЕРНОГО МОНИТОРИНГА АТМОСФЕРЫ В ЗОНЕ ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ

(представлено д-ром физ.-мат. наук Яковлевым С.В.)

Анализ теоретических основ лазерных измерений состава воздушной среды и оценка 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: чрезвычайная ситуация, экологический мониторинг, атмосфера, дистанционные методы зондирования, лазер

Постановка проблемы. Состояние атмосферного воздуха в современных условиях определяется в значительной степени составом и количеством вредных и опасных веществ, выбрасываемых из различных источников промышленных предприятий. Действующая в Украине система нормирования выбросов загрязняющих веществ от промышленных объектов обеспечивает установление предельного количества выбросов по каждому ингредиенту с применением контролирующими органами экономических, административных и даже уголовных ответственности за преувеличение установленных лимитов выбросов. Но отсутствие постоянного оперативного контроля выбросов по каждому источнику позволяет виновным избежать таких наказаний, или осуществлять увеличенные выбросы во время, когда отсутствует контроль со стороны СЭС и экологического надзора. Существующие методы периодического контроля за состоянием выбросов загрязняющих веществ, применяемых лабораториями различных контролирующих органов, не дают оперативных результатов, так как требуют обязательного отбора проб с последующим их анализом и обработкой результатов.

Стремительное развитие всех отраслей промышленности, энергетики, транспорта, увеличение численности населения, ур-

банизация 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. Необходимым такой контроль является также для проверки деятельности идентифицированных и паспортизованных потенциально опасных объектов, являющихся одной из основных задач гражданской обороны.

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 радарам).

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

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 реакций типа кислоты и окислители, а также твердые пылинки с размерами от 10^{-8} до 10^{-3} м (аэрозоли). Молекулы газов – загрязнителей и аэрозоли поглощают и рассеивают лазерное излучение. На этом базируются методы лазерного мониторинга загрязнений в атмосфере.

Постановка задачі и ее решение. Провести анализ теоретических основ лазерных измерений состава воздушной среды. Оценить возможность применения анализа в чрезвычайных ситуациях. Предложить метод решения задачи оперативного мониторинга состава газов примесей газов и аэрозолей в зоне чрезвычайной ситуации применением единого комплекса лазерной измерительной аппаратуры.

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 негоревшие частицы вещества. Их состав и концентрация также априори неизвестны.

Несвойственные атмосфере 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.

Основным уравнением лазерной локации называют 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

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

где P_S – мощность отраженного (рассеянного) излучения; P – мощность лазера; S – эффективная площадь (апертура) приемного элемента; η – эффективность приемного элемента; 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 импульса 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) Γ зависит от α , β в свою очередь

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

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

Для α_m установлено следующее соотношение

$$\alpha_m = \frac{3}{8\pi} \beta_m, \quad (4)$$

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

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

где n – показатель преломления воздуха; δ – степень деполяризации рассеянного излучения.

Для его описания преобразуем множитель A_δ 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

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

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

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

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 мкм, R_m – метеорологическая дальность видимости в км при $\lambda = 0.55$ мкм, q – показатель степени, который зависит от R_m .

При этом

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

Так, при $R_m \leq 6$ км [8]

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

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 $q \approx 1.6$. 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	δ , %
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

Таблиця 2 – Значення метеорологічної видимості при довжині волни $\lambda = 5.5 \cdot 10^{-7}$ м [8]

Умовия видимості	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

Таблиця 3 – Расчетные значения q , α_a и $\Gamma_a(R_m)$ при различных R_m и $\lambda = 5.5 \cdot 10^{-7}$ м

Умовия в зоне ЧС	R_m , м	q	α_a , 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	$3.9 \cdot 10^{-6}$	$3.9 \cdot 10^{-3}$

Результаты расчетов α_a и $\Gamma_a(R_m)$ для CO₂- и СО-лазеров приведены в табл. 4. Считалось, что для этих лазеров в среднем $\lambda_1 = 12.3$ мкм и $\lambda_2 = 5.5$ мкм.

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

При этом

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

Отсюда

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

Таблиця 4 – Значення α_a і $\Gamma_a(R_m)$ для CO₂- і CO-лазерів

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

Тогда

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

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

Таблиця 5 – Результаты расчета максимальных размеров зоны чрезвычайной ситуации для CO₂- и CO-лазеров

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

Из табл. 5 видно, что максимальные размеры зоны чрезвычайной ситуации, подлежащий 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 чрезвычайной ситуации.

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: 0.354–1.750 км, а $R_{\max}(\lambda_2)$ – в пределах: 0.338–1.619 км.

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.

Обратимся к уравнению (2). В этом уравнении только Γ зависит от длины волны λ (частоты ν) электромагнитного излучения. Для исключения неизвестных 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 максимума.

Представим уравнение (2) в виде

$$P_s(\lambda) = Be^{-2\Gamma(\lambda)}, \quad (6)$$

где $B = \frac{PS\eta C}{R_0^2}$.

Прологарифмировав (6), получим

$$\ln P_s(\lambda) = \ln B - 2\Gamma(\lambda). \quad (7)$$

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

$$\ln P_s(\lambda_1) = \ln B - 2\Gamma(\lambda_1), \quad (8)$$

$$\ln P_s(\lambda_2) = \ln B - 2\Gamma(\lambda_2). \quad (9)$$

После вычитания (8) из (9) имеем

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

Учтем, что

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

где σ – лоренцева кривая.

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

При однородном распределении атмосферных примесей

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

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

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

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

Из (10) следует, что

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

или

$$\Delta\Gamma = N\Delta\sigma \times R_0, \quad (14)$$

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

С другой стороны, из (10) следует, что

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

Тогда из (14), (15) получаем

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

Аналогічно из (13) и (14) следует, что

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

В случае неоднородного распределения загрязнений в атмосферном газе для нахождения N вдоль лазерного луча необходимо решать уравнение (11) – интегральное уравнение Вольтерра. Для его решения необходимо и правую часть в (11) продифференцировать по верхнему пределу R_0 . Тогда решение (11) примет вид

$$N(R_0) = \sigma(\lambda_1, \lambda_2)^{-1} \frac{d\Gamma(R_0, \lambda_1, \lambda_2)}{dR_0}. \quad (18)$$

Из (16) и (19) следует, что

$$N(R_0) = (2\Delta\sigma)^{-1} \frac{d}{dR_0} \ln \frac{P_s(\lambda_1)}{P_s(\lambda_2)}. \quad (19)$$

Соотношение (19) дает значение концентрации примесей на расстоянии R_0 .

Выводы. Проведен анализ теоретических основ лазерных измерений состава воздушной среды. Предложена методика решения задачи оперативного мониторинга состава газов примесей и аэрозолей в зоне чрезвычайной ситуации применением единого комплекса лазерной измерительной аппаратуры.

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. *Rev. 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. Исимару. 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.

Третьяков О.В., Рашкевич О.С.

Оцінка можливості застосування лазерних досліджень атмосфери зони надзвичайної ситуації

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

Ключові слова: надзвичайна ситуація, екологічний моніторинг, атмосфера, дистанційні методи зондування, лазер

Tretyakov O.V., Rashkevich A.S.

Evaluate the application of laser for atmospheric zone of an emergency

Analysis of the theoretical foundations of laser measurements of air pollution and to assess the possibility of its use in emergency situations (ES). Proposed method for solving real-time monitoring of trace gases and aerosols in the emergency area using a single set of laser measuring equipment.

Key words: emergency, environmental monitoring, the atmosphere, remote sensing techniques, laser