

УДК 535.361;551.501.7

П.П. Гейко

## Контроль концентрации отравляющих веществ лидаром дифференциального поглощения на основе CO<sub>2</sub>-лазера

Проведен анализ возможностей дистанционного обнаружения отравляющих веществ методом дифференциального поглощения. Выбраны, с учетом мешающего поглощения водяным паром, пригодные для их зондирования линии излучения CO<sub>2</sub>-лазера. Рассчитана дальность зондирования отравляющих газов лидаром на базе CO<sub>2</sub>-лазера. Проанализированы факторы, влияющие на дальность зондирования.

**Ключевые слова:** метод дифференциального поглощения, лидар, CO<sub>2</sub>-лазер.

Наиболее эффективно задача разработки оперативных средств дистанционного обнаружения и идентификации источников заражения может решаться на основе лидарных технологий, зарекомендовавших себя в экологическом мониторинге.

К настоящему времени список отравляющих веществ содержит десятки наименований. Каждое из этих веществ обладает высокой токсичностью и способно вызвать летальный исход или нанести тяжкий вред здоровью человека. Наиболее распространенными из них являются: зарин, зоман, табун, циклозарин, VX, люизит.

Как известно, наибольшей чувствительностью обладают методы дистанционного контроля компонентов атмосферы, основанные на эффекте селективного поглощения оптического излучения. Лидарные отклики, обусловленные отражением лазерных импульсов, имеющих близкие длины волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  на атмосферных аэрозолях или топографических объектах, одинаково ослабляются в чистой атмосфере. Однако при попадании в облако примеси отклик на  $\lambda_1$  ослабляется сильнее, чем отклик на  $\lambda_2$ . Совместная обработка сигналов позволяет рассчитать концентрацию, если известны коэффициенты поглощения на указанных длинах волн.

В области 9–11 мкм имеются интенсивные колебательно-вращательные полосы поглощения ряда отравляющих газов [1]. Подходящий лазер, используемый для обнаружения этих веществ, должен обладать высокой пиковой мощностью, достаточно узкой спектральной шириной и короткой длительностью импульса при малой угловой расходимости излучения, а также сравнительно высокой частотой повторения импульсов. Этим требованиям вполне удовлетворяет ТЕА CO<sub>2</sub>-лазер [2].

Целью данной работы является исследование факторов, определяющих параметры и технические характеристики лидара дифференциального поглощения на базе CO<sub>2</sub>-лазера для зондирования отравляющих газов в ИК-области спектра.

### Выбор линий для зондирования и физические принципы детектирования

В атмосфере, помимо самого отравляющего вещества, имеются другие фоновые газы (пары H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> и т.д.), поглощение которыми оказывает мешающее влияние на выбор оптимальных длин волн зондирования. Используя атлас спектральных линий [3], нами рассчитывалось мешающее поглощение фоновыми газами, прежде всего CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O, так как именно поглощение водяным паром в участке спектра 9–11 мкм вносит существенные коррективы при выборе пары линий для зондирования. Спектральная информация по отравляющим газам взята из [1]. На рис. 1 в качестве примера приведен рассчитанный спектр пропускания атмосферы на однокилометровой трассе и зарина с парой линий излучения, выбранных для зондирования. Подобные расчеты проведены и для других отравляющих газов.

Наложив спектр пропускания паров H<sub>2</sub>O и CO<sub>2</sub> на спектр пропускания отравляющего вещества, можно найти пару линий, одна из которых ( $\lambda_1$ ) приходится на максимум поглощения, а другая ( $\lambda_2$ ) лежит в крыле полосы поглощения, при этом поглощение мешающими газами мало и примерно одинаково. Параметры атмосферы выбирались следующие: летняя модель средних широт Северного полушария, давление – 1 атм. температура – 296 К. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Мощность пришедшего на приемник обратно рассеянного лазерного излучения на двух длинах волн  $\lambda_i$  ( $i=1,2$ ) можно представить следующим выражением [4]:

$$P(R, \lambda_i) = \frac{cEK_1K_2\beta_\pi(\lambda_i)}{2} \left( \frac{A}{R^2} \right) G(R) \exp 2 \left\{ - \int [\alpha_g(\lambda_i, z) + \alpha_a(\lambda_i, z)] dz \right\}, \quad (1)$$

где  $R$  – расстояние;  $E$  – энергия излучения лазера;  $c$  – скорость света;  $K_1, K_2$  – оптические эффективности передатчика и приемника лидара;  $A$  – площадь апертуры приемника;  $\beta_\pi(\lambda_i)$  – объемный коэффициент обратного рассеяния атмосферного аэрозоля,  $\alpha_g$  и  $\alpha_a$  – коэффициенты молекулярного и аэрозольного ослабления соответственно.

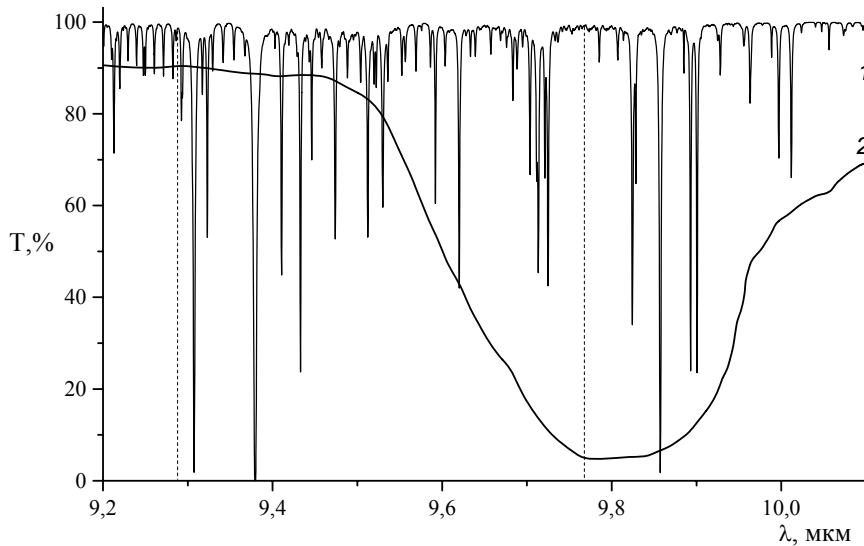


Рис. 1. Спектр пропускания для паров  $H_2O$  (1) и зарина (2) с выбранной парой линий излучения  $CO_2$ -лазера

Таблица 1

Выбранные линии излучения  $CO_2$ -лазера и сечения поглощения отравляющих газов

Отравляющее вещество	Люизит	Зарин	Зоман	Табун	VX	Циклозарин
Тип перехода и длина волны $\lambda_1$ , мкм	10P(30) 10,696	9P(44) 9,773	9P(40) 9,733	9P(22) 9,569	9P(16) 9,520	9P(26) 9,604
Тип перехода и длина волны $\lambda_2$ , мкм	10R(34) 10,158	9R(18) 9,282	9R(4) 9,367	9R(40) 9,174	10R(36) 10,115	9R(38) 9,183
$\sigma_1 \times 10^{-22}$ , м <sup>2</sup>	0,12	1,093	1,268	0,753	0,802	0,726
$\sigma_2 \times 10^{-22}$ , м <sup>2</sup>	0,007	0,037	0,068	0,068	0,055	0,027
$\sigma_{12} \times 10^{-22}$ , м <sup>2</sup>	0,113	1,056	1,2	0,685	0,747	0,699

Кроме того, рассмотрим также режим измерений, в котором регистрируются экосигналы, диффузно отраженные от различных топографических объектов. При этом возможно определение усредненных концентраций газов на длинных трассах по отдельным направлениям, соответствующим азимуту топомешней. Частным случаем этого режима является использование в качестве мишени зеркального отражателя.

Мощность единичных экосигналов, детектируемых приемной системой лидара при отражении от топографической цели, можно представить следующим выражением:

$$P(R) = PK_1K_2\rho \left( \frac{A}{R^2} \right) G(R)T^2, \quad (2)$$

где  $R$  – расстояние;  $P$  – пиковая мощность импульсов излучения лазера;  $K_1, K_2$  – оптические эффективности передатчика и приемника лидара соответственно;  $\rho$  – отражательная способность топомешней в единицу телесного угла;  $A$  – площадь апертуры приемника;  $T = \exp \left\{ - \int [\alpha_g(\lambda, z) + \alpha_a(\lambda, z)] dz \right\}$  – пропускание атмосферы на длине волны зондирования;  $\alpha_g$  и  $\alpha_a$  – коэффициенты ослабления излучения из-за поглощения молекулярными газами и атмосферного аэрозоля соответственно.

В ИК-области спектра основным ограничивающим фактором является дробовой шум детектора. При детектировании одиночных лидарных сигналов рассмотрим отношение сигнал/шум  $\varepsilon$ , которое записывается в виде [4]

$$\varepsilon = \frac{I_s}{\sqrt{2eB(I_s + I_b + I_d)}}, \quad (3)$$

где  $I_s$  – сигнальный ток;  $I_b$  – ток, обусловленный фоновой засветкой;  $I_d$  – темновой ток;  $e$  – заряд электрона;  $B$  – ширина полосы пропускания детектора. Выражение (3) можно переписать в единицах оптической мощности:

$$\varepsilon = \frac{P_s}{\frac{\sqrt{2B(P_s + P_b)hv}}{\eta} + BP_{ne}^2}, \quad (4)$$

где  $P_s$  – мощность принимаемого сигнала;  $P_b$  – мощность фонового излучения атмосферы, падающая на площадку детектора;  $\eta$  – квантовая эффективность детектора;  $P_{ne}$  – эквивалентная мощность шума детектора;  $hv$  – энергия кванта.

Эквивалентная мощность шума  $P_{ne}$  выражается через площадь приемной площадки детектора  $A_d$  и обнаружительную способность детектора  $D^*$ :

$$P_{ne} = \frac{\sqrt{A_d}}{D^*}. \quad (5)$$

Обнаружительную способность можно записать как

$$D^* = \frac{\eta e}{hv} \sqrt{\frac{A_d}{2eI_d}}. \quad (6)$$

Выражение для мощности фонового излучения атмосферы, падающего на площадку детектора, имеет вид

$$P_b = K_2 B_a(\lambda) \Omega \Delta\lambda, \quad (7)$$

где  $B_a(\lambda)$  – яркость фонового излучения;  $\Omega$  – телесный угол зрения приемника;  $\Delta\lambda$  – спектральная ширина полосы пропускания приемника.

### Результаты моделирования

Рассмотрим традиционную схему биаксиального CO<sub>2</sub>-лидара. Для моделирования достижимой дальности зондирования принимались технические характеристики лидара, близкие к характеристикам, приведенным в работах [5, 6]. Так, для передатчика выбирались следующие параметры: энергия импульсов излучения  $E = 1$  Дж; пиковая мощность импульсов излучения  $P = 100$  МВт; оптическая эффективность формирователя пучка  $K_1 = 0,7$ ; выходной диаметр пучка  $2a_t = 100$  мм; расходимость пучка  $2\theta = 1$  мрад. Выходная апертура зондирующих пучков  $2a_t$  выбрана таковой во избежание нелинейного поглощения излучения воздухом. Угол поля зрения приемника лидара  $2\varphi$  превышает расходимость зондирующего пучка  $2\theta$  в 1,5 раза. Приемник имеет следующие характеристики: диаметр апертуры телескопа  $2a_r = 300$  мм; фокусное расстояние телескопа  $f = 1500$  мм; угол зрения приемника  $2\varphi = 1,5$  мрад; оптическая эффективность приемника  $K_2 = 0,8$ ; ширина полосы пропускания  $B = 1$  МГц; расстояние между осями передатчика и приемника  $b_0 = 400$  мм; угол схождения осей передатчика и приемника  $\psi = 0$  мрад. Отражательная способность тополишенной выбиралось равной  $0,01$  ср<sup>-1</sup>.

В качестве детектора в приемнике лидарной системы рассматривался фотодиод HgMnTe со следующими параметрами: обнаружительная способность  $D^* = 2 \times 10^{11}$  см·Гц<sup>1/2</sup>·Вт<sup>-1</sup>; эквивалентная мощность шума  $P_{ne} = 2,2 \times 10^{-13}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup>; размер чувствительной площадки  $d = 0,5$  мм; рабочая температура  $T = 77$  К; спектральная полоса пропускания  $\Delta\lambda = 4$  мкм.

Рассмотрим влияние различных факторов, определяющих дальность действия лидара в приземном слое атмосферы. Примем фоновые значения концентраций атмосферных газов, а также параметры приземного слоя стандартной атмосферы лета средних широт: коэффициенты ослабления  $\alpha_a = 0,03047$  км<sup>-1</sup> и обратного рассеяния атмосферного аэрозоля  $\beta_\pi = 9,967 \cdot 10^{-5}$  км<sup>-1</sup>·ср<sup>-1</sup>, яркость фонового излучения  $B_a(\lambda) = 10^{-4}$  Вт/см<sup>2</sup>·ср·мкм. Расчеты проводились для линий, приведенных в табл. 1. Концентрация отравляющих веществ принималась следующей: табун – 5,5; зарин – 1,2; зоман – 0,43; VX – 0,84; люизит – 14,05; циклозарин – 1,2 ppm соответственно. Эти концентрации отвечают 10% от предельных концентраций, приводящих к получению летальной дозы при одномоментной экспозиции [1].

На рис. 2 представлены рассчитанные зависимости отношения сигнал/шум  $\varepsilon$  от дальности для каждого из отравляющих газов. Кривые построены для случая регистрации одиночных лидарных эхосигналов.

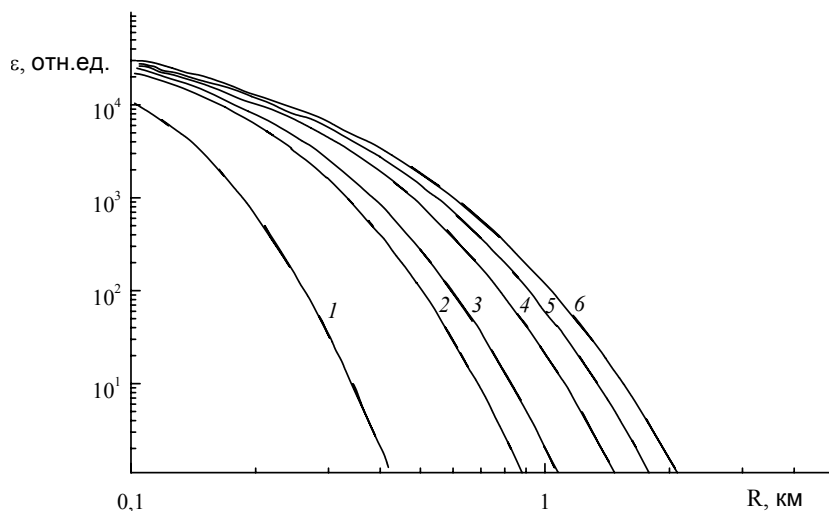


Рис. 2. Зависимости отношения сигнал/шум от расстояния при регистрации единичного лидарного эхосигнала для табуна (1), люизита (2), зарина (3), циклозарина (4), VX (5), зомана (6)

Из рис. 2 можно определить предельные дальности зондирования при  $\varepsilon = 1$  для каждого из отравляющих веществ; так, для табуна  $\sim 0,4$ ; люизита  $\sim 0,9$ ; зарина  $\sim 1$ ; циклозарина  $\sim 1,5$ ; VX  $\sim 1,8$ ; и зомана  $\sim 2,1$  км. С переходом в режим работы по топографическому отражателю значения предельных дальностей естественно возрастают и составляют для табуна  $\sim 0,8$ ; люизита  $\sim 1,7$ ; зарина  $\sim 2,2$ ; циклозарина  $\sim 3,1$ ; VX  $\sim 3,9$  и зомана  $\sim 4,7$  км.

Поскольку диаметр приемного зеркала крайне важен для обеспечения мобильности лидара и влияет на его габаритные характеристики, рассматривалось влияние площади апертуры приемника на дальность зондирования. При увеличении площади приемного телескопа возрастают регистрируемые мощности как полезного сигнала, так и фоновой засветки. Расчеты показывают, что увеличение площади приемного телескопа от  $0,1$  до  $1 \text{ м}^2$  приведет к незначительному возрастанию дальности зондирования.

Исследовалось также влияние угла поля зрения приемника лидара на дальность зондирования. Использование больших углов зрения приводит к уменьшению ошибок измерения концентрации газовых примесей в атмосфере. При увеличении угла зрения приемника мощность эхосигналов не меняется, однако увеличивается мощность фонового излучения, падающая на детектор, что отражается на отношении сигнал/шум  $\varepsilon$  и дальности зондирования. Полагали, что отношение между углом зрения приемника лидара и расходимостью зондирующего пучка  $\varphi/\theta = 1,5$  неизменно. Слабая зависимость от угла зрения приемника наблюдается в диапазоне от  $1$  до  $2-3$  мрад, затем при увеличении угла зрения дальность зондирования падает, это справедливо для всех исследуемых отравляющих веществ.

Рассмотрим влияние энергетических характеристик лазера на дальность зондирования. При увеличении энергии и пиковой мощности дальность зондирования возрастает, причем эта зависимость хорошо описывается эмпирическим уравнением

$$R_i(W) = A_i \cdot \ln(W) + B_i, \quad (8)$$

где  $R_i$  – дальность зондирования при условии  $\varepsilon = 1$ ,  $i$  – тип отравляющего вещества. Значения числовых коэффициентов  $A_i$  и  $B_i$ , а также их среднеквадратичные отклонения  $\sigma$  для каждого отравляющего вещества приведены в табл. 2.

Десятикратное увеличение энергии импульсов с  $1$  до  $10$  Дж приводит лишь к незначительному возрастанию дальности зондирования. Так, возрастание дальности зондирования при увеличении энергии импульсов с  $1$  до  $10$  Дж составляет для табуна  $\sim 17,3$ ; люизита  $\sim 19,5$ ; зарина  $\sim 20,1$ ; циклозарина  $\sim 21,9$ ; VX  $\sim 22,5$ ; зомана  $\sim 23,5\%$  соответственно. При работе по топографическому отражателю при увеличении пиковой мощности импульсов со  $100$  до  $1000$  МВт составляет для табуна  $\sim 11,6$ ; люизита  $\sim 12,9$ ; зарина  $\sim 13,2$ ; циклозарина  $\sim 13,8$ ; VX  $\sim 14,2$ ; зомана  $\sim 14,5\%$  соответственно.

Таблица 2

**Коэффициенты уравнения (7) и значения среднеквадратичного отклонения**

Отравляющее вещество	Люизит	Зарин	Зоман	Табун	$VX$	Циклозарин
<i>A</i>	0,089	0,113	0,259	0,038	0,213	0,167
<i>B</i>	0,897	1,093	2,139	0,434	1,831	1,502
$\sigma$	0,008	0,011	0,032	0,003	0,026	0,019

Поэтому увеличение энергетических параметров лазеров по сравнению с реализованными ранее в работах [5, 6] параметрами излучения для использования в мобильном или стационарном лидаре нецелесообразно. Проведенные расчеты не учитывали нелинейное поглощение атмосферы, возможный пробой и образование плазмы при распространении такого мощного излучения. Учет этих эффектов привел бы к уменьшению предельной дальности зондирования, что является дополнительным фактором, указывающим на отсутствие необходимости использования сложных в эксплуатации, громоздких лазеров с энергиями в импульсе десятки джоулей.

**Заключение**

Таким образом, исходя из спектральной зависимости поглощения наиболее распространенных и опасных отравляющих газов перспективными для их обнаружения являются лидары на основе CO<sub>2</sub>-лазера, работающие по дифференциальной методике. Оценки относительной погрешности измерения концентрации показали, что возможно зондирование отравляющих газов при их концентрации, составляющей 10% от предельной с использованием обратного аэрозольного рассеяния в радиусе до ~ 2 км, в зависимости от типа отравляющего вещества, а с использованием диффузного отражения – от топомешеней на расстояниях до ~ 5 км.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ, ГК № 16.518.11.7048.

*Литература*

1. Webber M.E. Optical detection of chemical warfare agents and toxic industrial chemicals: Simulation / Webber M.E., Pushkarsky M. Patel C.K // Journal of applied physics. – 2005. – Vol. 97. – P. 113–124.
2. Горобец В.А. Перестраиваемый по линиям обычных и нетрадиционных полос ТЕ CO<sub>2</sub>-лазер для лидарных систем / В.А. Горобец, В.О. Петухов, С.Я. Точицкий, В.В. Чураков // Квантовая электроника. – 1995. – Т. 22, № 5. – С. 514–518.
3. Rothman L.S. The HITRAN 2004 molecular spectroscopic database / L.S. Rothman, D. Jacquemart, A. Barbe // Journal of quantitative spectroscopy & radiative transfer. – 2005. – Vol. 96. – P. 139–204.
4. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. – М.: Мир, – 1987. – С. 550.
5. Иващенко М.В. Дальность действия лидара дифференциального поглощения на основе CO<sub>2</sub>-лазера / М.В. Иващенко, И.В. Шерстов // Квантовая электроника. – 2000. – Т. 30, № 4. – С. 747–752.
6. Andreev Y.M. Development and testing of the lidar gas analyzing complex / Y.M. Andreev, P.P. Geiko, I.V. Sherstov // Proc. SPIE. – 1999. – Vol. 3983. – P. 386–394.

**Гейко Павел Пантелеевич**

Д-р физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, профессор каф. электронных приборов ТУСУРа  
Тел.: 8-(382-2)-41-38-87  
Эл. почта: ppg@imces.ru

Geiko P.P.

**The Remote Sensing of chemical warfare agent by CO<sub>2</sub>-differential absorption lidar**

The possibilities of remote sensing of chemical warfare agent by differential absorption method were analyzed. The CO<sub>2</sub>-laser emission lines suitable for sounding of chemical warfare agent with provision for disturbing absorptions by water vapor were chosen. The echolocation range is simulated for detection of chemical warfare agent by lidar based on CO<sub>2</sub>-laser. The other factors which influence on echolocation range were analyzed.

**Keywords:** differential absorption method, lidar, CO<sub>2</sub>-laser.