

Возможности зондирования отравляющих веществ с помощью CO₂-лидара методом дифференциального поглощения

С.М. Бобровников¹, П.П. Гейко², И.С. Попов^{2*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3

Поступила в редакцию 10.07.2008 г.

Проведен анализ возможностей дистанционного обнаружения газообразных отравляющих веществ методом дифференциального поглощения. Выбраны, с учетом мешающего поглощения водяным паром, пригодные для их зондирования линии излучения CO₂-лазера. Рассчитана дальность зондирования отравляющих газов лидаром на базе CO₂-лазера. Проанализированы факторы, влияющие на дальность зондирования.

Ключевые слова: лидар, дифференциальное поглощение, CO₂-лазер.

Введение

Задача разработки высокоточных средств дистанционного обнаружения и идентификации источников заражения наиболее эффективно 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 λ_1 и λ_2 на атмосферных аэрозолях или топографических объектах, одинаково ослабляются в чистой атмосфере. Однако при попадании в облако примеси отклик на λ_1 ослабляется сильнее, чем отклик на λ_2 . Совместная обработка сигналов позволяет рассчитать концентрацию примесей, если известны коэффициенты поглощения на указанных длинах волн. Высокая интенсивность сигнала позволяет добиться высокой оперативности получения информации о пространственно-временном распределении концентрации примеси в атмосфере за счет возможности быстрого сканирования контролируемого объема. Однако возникают

трудности, связанные с поиском полос поглощения или отдельных линий в спектре вещества, подлежащего обнаружению.

В области 9–11 мкм имеются интенсивные колебательно-вращательные полосы поглощения ряда отравляющих газов [1, 2]. Подходящий лазер, используемый для обнаружения этих веществ, должен обладать высокой пиковой мощностью, достаточно узкой спектральной шириной и короткой продолжительностью импульса при малой угловой расходимости излучения, а также сравнительно высокой частотой повторения импульсов. Этим требованиям вполне удовлетворяет ТЕА–CO₂-лазер [3, 4].

Выбор линий для зондирования и физические принципы

В атмосфере помимо самого отравляющего вещества имеются другие фоновые газы (пары H₂O, CO₂ и т.д.), которые оказывают мешающее влияние на выбор оптимальных длин волн зондирования. С помощью атласа спектральных линий [5] рассчитывалось мешающее поглощение отравляющего вещества фоновыми газами, прежде всего CO₂ и H₂O, 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]. Наложив спектр пропускания паров H₂O и CO₂ на спектр пропускания отравляющего вещества, можно найти пару линий, одна из которых (λ_1) находится в максимуме поглощения, а другая (λ_2) лежит в крыле полосы поглощения, при этом поглощение мешающими газами мало и примерно одинаково. Параметры атмосферы выбирались следующими:

* Сергей Михайлович Бобровников (bsm@iao.ru); Павел Пантелеевич Гейко (ppg@imces.ru); Иван Сергеевич Попов.

Выбранные линии излучения CO₂-лазера и сечения поглощения σ отравляющих газов

Отравляющее вещество	Люизит	Зарин	Зоман	Табун	VX	Циклозарин
Тип перехода	10P(30)	9P(44)	9P(40)	9P(22)	9P(16)	9P(26)
и длина волны λ_1 , мкм	10,696	9,773	9,733	9,569	9,520	9,604
Тип перехода	10R(34)	9R(18)	9R(4)	9R(40)	10R(36)	9R(38)
и длина волны λ_2 , мкм	10,158	9,282	9,367	9,174	10,115	9,183
$\sigma_1 \cdot 10^{-22}$, м ²	0,12	1,093	1,268	0,753	0,802	0,726
$\sigma_2 \cdot 10^{-22}$, м ²	0,007	0,037	0,068	0,068	0,055	0,027
$\sigma_{12} \cdot 10^{-22}$, м ²	0,113	1,056	1,2	0,685	0,747	0,699

летняя модель средних широт Северного полушария, давление – 1 атм, температура – 296 К. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Мощность прошедшего на приемник обратно рассеянного лазерного излучения на двух длинах волн λ_i ($i = 1, 2$) можно представить следующими выражениями [6]:

$$P(R, \lambda_i) = \frac{cE K_1 K_2 \beta_\pi(\lambda_i)}{2} \left(\frac{A}{R^2} \right) G(R) \times \exp 2 \left\{ - \int [\alpha_g(\lambda_i, z) + \alpha_a(\lambda_i, z)] dz \right\}, \quad (1)$$

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; α_g и α_a – коэффициенты молекулярного и аэрозольного ослабления соответственно; $G(R)$ – геометрический фактор лидара.

В ИК-области спектра основным ограничивающим фактором является дробовой шум детектора. При детектировании одиночных лидарных сигналов рассмотрим отношение сигнал-шум ε , которое записывается в виде [6]:

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

где I_s – сигнальный ток; I_b – ток, обусловленный фоновой засветкой; I_d – темновой ток; e – заряд электрона; B – ширина полосы пропускания детектора. Выражение (2) можно переписать в единицах оптической мощности [6, 7]:

$$\varepsilon = \frac{P_s}{\sqrt{\frac{2B(P_s + P_b)hv}{\eta} + BP_{ne}^2}}}, \quad (3)$$

где P_s – мощность принимаемого сигнала; P_b – мощность фонового излучения атмосферы, падающего на площадку детектора; η – 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^* :

$$P_{ne} = \sqrt{A_d} / D^*. \quad (4)$$

Обнаружительная способность, в свою очередь, записывается как

$$D^* = \frac{\eta e}{hv} \sqrt{\frac{A_d}{2eI_d}}. \quad (5)$$

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

$$P_b = K_2 B_a(\lambda) \Omega \Delta \lambda, \quad (6)$$

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

Результаты расчетов

Рассмотрим традиционную схему биаксиального CO₂-лидара. Для моделирования достижимой дальности зондирования принимались технические характеристики лидара, близкие к характеристикам, приведенным в [6, 7]. 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 зондирующего пучка $2\theta = 1$ мрад. Выходная апертура зондирующих пучков $2a_t$ выбрана таковой во избежание нелинейного поглощения излучения воздухом. Интенсивность излучения не должна превышать $0,8$ МВт/см² [7]. Угол поля зрения приемника лидара 2ϕ превышает расходимость зондирующего пучка 2θ в 1,5 раза. Приемник имеет следующие характеристики: диаметр апертуры телескопа $2a_r = 300$ мм; фокусное расстояние телескопа $f = 1500$ мм; угол зрения приемника $2\phi = 1,5$ 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.

В качестве детектора в приемнике лидарной системы рассматривался фотодиод HgMnTe со следующими параметрами: обнаружительная способность $D^* = 2 \cdot 10^{11}$ см² · Гц^{1/2} · Вт⁻¹; эквивалентная мощность шума $P_{ne} = 2,2 \cdot 10^{-13}$ Вт/Гц^{1/2}; размер чувствительной площадки $d = 0,5$ мм; рабочая температура $T = 77$ К; спектральная полоса пропускания $\Delta \lambda = 4$ мкм [9].

Рассмотрим влияние различных факторов на 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 $\alpha_a = 0,03047 \text{ км}^{-1}$ и обратного рассеяния атмосферного аэрозоля $\beta_p = 9,967 \cdot 10^{-5} \text{ км}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ [10], яркость фонового излучения $B_a(\lambda) = 10^{-4} \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{мкм})$. 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 ррм. Эти концентрации отвечают 10% от предельных концентраций, приводящих к получению летальной дозы при одномоментной экспозиции [1].

На рис. 1 представлены рассчитанные зависимости отношения сигнал-шум ϵ от дальности для каждого отравляющего газа. Кривые построены для случая регистрации одиночных лидарных эхосигналов.

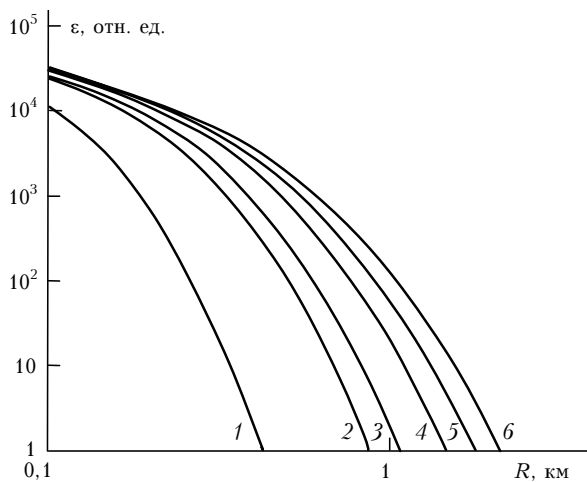


Рис. 1. Зависимости отношения сигнал-шум от расстояния при регистрации единичного лидарного эхосигнала для табуна (1), люизита (2), зарина (3), циклозарина (4), VX (5), зомана (6)

Из рис. 1 можно определить предельные дальности эхолокации при $\epsilon = 1$: для табуна $\sim 0,4$; люизита $\sim 0,9$; зарина ~ 1 ; циклозарина $\sim 1,5$; VX $\sim 1,8$ и зомана $\sim 2,1$ км.

Поскольку диаметр приемного зеркала крайне важен для обеспечения мобильности лидара и влияет на его массогабаритные 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 м^2 приведет к незначительному возрастанию дальности зондирования. Так, при увеличении площади приемного телескопа с $0,1$ до 1 м^2 возрастание дальности зондирования составляет для табуна $\sim 19,8$; люизита $\sim 22,8$; зарина $\sim 23,7$; циклозарина $\sim 25,5$; VX $\sim 26,7$ и зомана $\sim 27,8\%$.

Исследовалось также влияние угла поля зрения приемника лидара на дальность зондирования. Ис-

пользование больших углов зрения приводит к уменьшению ошибок измерения концентрации газовых примесей в атмосфере [6]. При увеличении угла зрения приемника мощность эхосигналов не меняется, однако увеличивается мощность фонового излучения, падающая на детектор, что отражается на отношении сигнал-шум ϵ и дальности зондирования. Полагали, что отношение между углом зрения приемника лидара и расходимостью зондирующего пучка $\phi/\theta = 1,5$ неизменно. Слабая зависимость от угла зрения приемника наблюдается в диапазоне от 1 до 2–3 мрад, затем при увеличении угла зрения дальность эхолокации падает, что справедливо для всех исследуемых отравляющих веществ.

Рассмотрим влияние энергетических характеристик лазера на дальность зондирования. На рис. 2 приведены расчетные зависимости дальности зондирования от энергии импульсов при $\epsilon = 1$ для отравляющих газов.

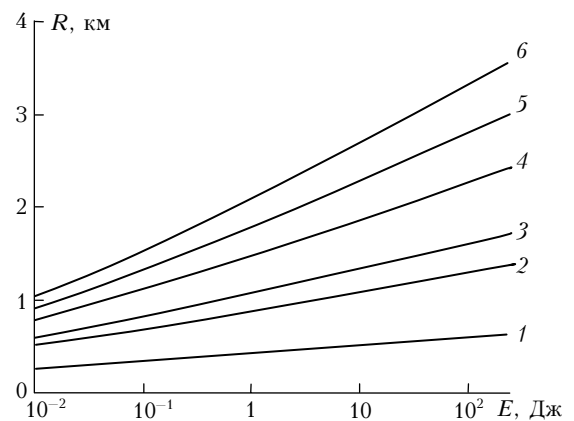


Рис. 2. Зависимости дальности зондирования от энергии импульсов при $\epsilon = 1$ для табуна (1), люизита (2), зарина (3), циклозарина (4), VX (5), зомана (6)

При увеличении энергии и пиковой мощности дальность зондирования возрастает, причем эта зависимость хорошо описывается эмпирическим уравнением

$$R_i(W) = A_i \ln(W) + B_i, \quad (7)$$

где R_i — дальность эхолокации при условии $\epsilon = 1$; $i = 1-6$ — тип отравляющего вещества. Значения числовых коэффициентов A_i и B_i , а также их среднеквадратические отклонения σ_e для каждого отравляющего вещества приведены в табл. 2.

Из рис. 2 следует, что 10-кратное увеличение энергии импульсов с 1 до 10 Дж приводит лишь к незначительному возрастанию дальности зондирования. Так, возрастание дальности эхолокации 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 $\sim 22,5$ и зомана $\sim 23,5\%$ соответственно, поэтому увеличение энергетических параметров лазеров по сравнению с реализованными ранее в работах [7, 8] параметрами излучения для использования в мобильном или стационарном лидаре нецелесообразно.

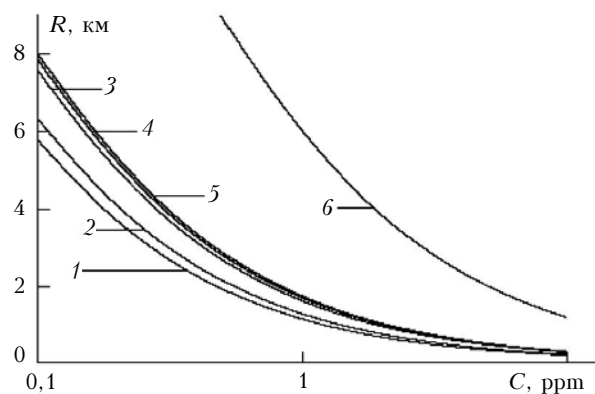
Таблица 2

Коэффициенты уравнения (7)
и значения среднеквадратического отклонения

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

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 эхолокации, что является дополнительным фактором, указывающим на отсутствие необходимости использования сложных в эксплуатации громоздких лазеров с энергиями в импульсе десятки джоулей.

Далее рассмотрим влияние концентрации отравляющего вещества в атмосфере на дальность зондирования. В проведенных выше расчетах использовалось значение, равное 10% от предельной концентрации каждого из отравляющих газов. Представляет интерес проанализировать дальность зондирования атмосферы при различных значениях концентраций отравляющих газов. На рис. 3 приведены расчетные зависимости дальности зондирования от концентрации отравляющих веществ в атмосфере при условии $\epsilon = 1$. Как видно из рис. 3, с уменьшением атмосферного ослабления, связанного с концентрацией, дальность зондирования возрастает.

Рис. 3. Зависимости дальности зондирования при $\epsilon = 1$ от концентрации зомана (1), зарина (2), VX (3), табуна (4), циклозарина (5), люизита (6)

Без учета влияния токсичного действия отравляющих газов была выбрана одинаковая концентрация 1 ppm для всех отравляющих веществ. Дальности эхолокации отравляющих веществ для концентрации 1 ppm приведены в табл. 3.

Рассмотрим погрешности измерения концентрации газов в атмосфере. Относительную погрешность δ_N в случае пренебрежения изменением рассеивающих свойств среды в спектральном интервале перестройки длин волн от λ_1 до λ_2 можно записать в виде [7]:

$$\delta_N =$$

$$= \sqrt{\frac{\delta_1^2(R) + \delta_1^2(R + \Delta R) + \delta_2^2(R) + \delta_2^2(R + \Delta R)}{n(2\sigma_{12} C \Delta R)^2} + \delta_K^2 + \delta_F^2}, \quad (8)$$

где σ_{12} — дифференциальное сечение поглощения; C — концентрация газа; δ_j — относительные погрешности измерения мощности лидарных эхосигналов; индексы $j = 1, 2$ соответствуют зондированию на длинах волн λ_1 и λ_2 ; n — число импульсов излучения; δ_K и δ_F — относительные погрешности определения коэффициента дифференциального поглощения и ошибки из-за влияния мешающих газов. Последние две величины относятся к систематической погрешности и не связаны с шумами детектора.

Таблица 3

Дальность зондирования
при концентрации газов $C = 1$ ppm

Отравляющее вещество	Зоман	Зарин	VX	Табун	Циклозарин	Люизит
Дальность зондирования, км	~1,1	~1,2	~1,5	~1,6	~1,6	~5,9

Проведем оценки относительной погрешности измерения концентраций отравляющих веществ в атмосфере согласно формуле (8), приняв для расчетов следующие величины: C — 10% от предельной концентрации отравляющего вещества; σ_{12} — данные из табл. 1; $n = 10$; $\delta_K \sim 0,1$; $\delta_F \sim 0,1$ [6]. При расчете выбрано пространственное разрешение $\Delta R = 100$ м.

На малых расстояниях, когда лидарные эхосигналы регистрируются с высоким отношением сигнал-шум, погрешности в измерении концентрации отравляющего вещества определяются величинами δ_K и δ_F . По мере увеличения дальности зондирования погрешности в определении мощности эхосигналов возрастают. Максимальные дальности зондирования, определенные по условию $\delta_N = 1$, составляют: табун ~ 0,3; люизит ~ 0,8; зарин ~ 1; циклозарин ~ 1,3; VX ~ 1,6 и зоман ~ 1,9 км.

Заключение

Таким образом, исходя из спектральной зависимости поглощения наиболее распространенных и опасных отравляющих газов, можно сделать вывод, что перспективными для их обнаружения являются лидары на основе CO_2 -лазера, работающие по дифференциальной методике. Выбраны оптимальные для зондирования пары линий излучения CO_2 -лазера. Проанализировано влияние различных факторов, определяющих дальность зондирования.

Дальность зондирования имеет близкую к логарифмической зависимость от энергии импульсов. Дальнейшее увеличение энергии лазерных импульсов по сравнению с реализованными параметрами излучателей незначительно повышает дальность зондирования и является нецелесообразным.

Оценки относительной погрешности измерения концентрации примесей 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.

Работа выполнена в рамках проекта МНТЦ № 3305 и проекта СО РАН № 7.13.1.2.

1. *Webber M.E., Pushkarsky M., Patel C.K.* Optical detection of chemical warfare agents and toxic industrial chemicals: Simulation // *J. Appl. Phys.* 2005. V. 97. N 11. P. 3101–3111.
2. *Струков О.Г., Фокин Е.А., Петрунин В.А., Завалишина И.В., Власова З.В.* Применение ИК-спектроскопии для идентификации иприта и люизита в емкостях, подлежащих уничтожению // *Химическая и биологическая безопасность.* 2004. № 5. С. 72–76.
3. *Горобец В.А., Петухов В.О., Тоцицкий С.Я., Чураков В.В.* Перестраиваемый по линиям обычных и нетрадиционных полос ТЕ–СО₂-лазер для лидарных систем // *Квант. электрон.* 1995. Т. 22. № 5. С. 514–518.
4. *Кольяков С.Ф., Маляевкин Л.П.* Лидар дифференциального поглощения на основе ТЕА–СО₂-лазера // *Квант. электрон.* 1988. Т. 15. № 1. С. 212–217.
5. *Rothman L.S., Jacquemart D., Barbe A., Benner D.C., Birk M., Brown L.R., Carleer M.R., Chackerian C., Jr., Chance K., Coudert L.H., Dana V., Devi V.M., Flaud J.-M., Gamache R.R., Goldman A., Hartmann J.-M., Jucks K.W., Maki A.G., Mandin J.-Y., Massie S.T., Orphal J., Perrin A., Rinsland M.A., Smith M.A.H., Tennyson J., Tolchenov R.N., Toth R.A., Vander Auwera J., Varanasi P., Wagner G.* The HITRAN 2004 molecular spectroscopic database // *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer.* 2005. V. 96. N 2. P. 139–204.
6. *Межерис Р.* Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.
7. *Иващенко М.В., Шерстов И.В.* Дальность действия лидара дифференциального поглощения на основе СО₂-лазера // *Квант. электрон.* 2000. № 30. С. 747–752.
8. *Andreev Y.M., Geiko P.P., Sherstov I.V.* Development and testing of the lidar gas analyzing complex // *Proc. SPIE.* 1999. V. 3983. P. 386–394.
9. *Рогальский А.* Инфракрасные детекторы. Новосибирск: Наука, 2003. 636 с.
10. *Креков Г.М., Рахимов Р.Ф.* Оптические модели атмосферного аэрозоля. Томск: Изд. ТФ СО АН СССР, 1986. 283 с.

***S.M. Bobrovnikov, P.P. Geiko, I.S. Popov.* The possibilities of remote sensing of chemical warfare agent with CO₂ lidar by differential absorption method.**

The possibilities of remote sensing of chemical warfare agent by differential absorption method were analyzed. The CO₂-laser emission lines suitable for sounding of chemical warfare agent with provision for disturbing absorptions by water vapor were chosen. The echolocation range are simulated for detection of chemical warfare agent by lidar based on CO₂-laser. The other factors influencing upon echolocation range were analyzed.