

emission of this source was used for absorption and phase-contrast radiography of micro- and nanoobjects. LiF crystals were employed for x-ray image detection with submicrometer spatial resolution.

PACS: 06.30.-k

УДК 535.361:551.501.7

Возможности дистанционного зондирования токсичных газов с помощью CO₂-лазера

П. П. Гейко, И. С. Попов

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск, Россия

Проведен анализ возможностей дистанционного обнаружения ряда токсичных газов методом дифференциального поглощения. С учетом мешающего поглощения водяным паром выбраны линии излучения CO₂-лазера, пригодные для зондирования. Рассчитана дальность зондирования отравляющих газов лидаром на базе CO₂-лазера, работающим по топографическим и зеркальным отражателям. Исследовано влияние различных факторов на дальность зондирования.

PACS: 06.20.-r, 42.68.Wt, 42.79.Qx, 42.55.Lt

Введение

Наиболее эффективно задача разработки высокоточных средств дистанционного обнаружения и идентификации источников заражения токсичными газами может решаться на основе лидарных технологий, зарекомендовавших себя в экологическом мониторинге. К настоящему времени насчитываются десятки наименований различных отравляющих веществ. 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 топографических объектах, атмосферных аэрозолях или зеркальных отражателях, одинаково ослабляются в чистой атмосфере. Однако при попадании в облако примеси лидарный отклик на длине волны λ_1 , попадающей в полосу поглощения исследуемого газа, ослабляется сильнее, чем отклик на длине волны λ_2 , лежащей в области прозрачности.

Совместная обработка сигналов дает возможность рассчитать концентрацию, 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]. 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].

Физические принципы и выбор линий излучения

Естественно, что в атмосфере, помимо самого отравляющего вещества, имеются другие газы (пары H₂O, CO₂ и т. д.), поглощение которыми оказывает мешающее влияние на выбор оптимальных длин волн зондирования.

Используя атлас спектральных линий [5], авторами было рассчитано мешающее поглощение

фоновыми газами, прежде всего CO_2 и H_2O , так как поглощение именно этими газами в участке спектра 9—11 мкм вносит существенные коррективы при выборе пары линий для зондирования. Наложив спектр пропускания чистой атмосферы на спектр пропускания отравляющего вещества, можно найти пару линий, одна из которых (λ_1) приходится на максимум поглощения, а другая (λ_2) лежит в крыле полосы поглощения, при этом поглощение мешающими газами мало и примерно одинаково. Спектральная информация по отравляющим газам взята из работы [1].

На рис. 1 в качестве примера приведен рассчитанный спектр пропускания атмосферы на однокилометровой трассе и циклозарина с парой линий излучения, выбранных для зондирования. Подобные расчеты проведены и для других отравляющих газов.

Параметры атмосферы выбирались следующими: летняя модель средних широт северного полушария, давление 1 атм, температура 296 К. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

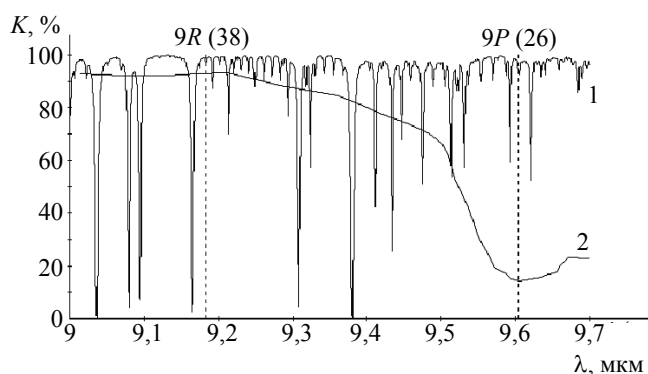


Рис. 1. Спектр пропускания однокилометровой трассы чистой атмосферы (1) и циклозарина (2) с выбранной парой линий излучения CO_2 -лазера

шеней. Частным случаем этого режима является использование в качестве мишени зеркального отражателя.

Мощность единичных эхосигналов, детектируемых приемной системой лидара при отражении от топографической цели, можно представить следующим выражением [6]:

$$P(R) = PK_1K_2\rho\left(\frac{A}{R^2}\right)G(R)T^2, \quad (1)$$

где R — расстояние;

P — пиковая мощность импульсов излучения лазера;

K_1, K_2 — оптические эффективности передатчика и приемника лидара, соответственно;

ρ — отражательная способность топомишени в единицу телесного угла;

A — площадь апертуры приемника;

$T = \exp\{-\int[\alpha_g(\lambda, z) + \alpha_a(\lambda, z)]dz\}$ — пропускание атмосферы на длине волны зондирования;

α_g и α_a — коэффициенты ослабления излучения из-за поглощения молекулярными газами и атмосферного аэрозоля, соответственно.

В случае использования зеркального отражателя мощность отраженного сигнала определяется выражением

$$P(R) = \frac{PK_1K_2K_3d^4}{4\pi(1,22\lambda\theta)^2}\left(\frac{A}{R^4}\right)G(R)T^2, \quad (2)$$

где K_3 — оптическая эффективность рефлектора;

θ — половинный угол расходимости зондирующего пучка;

d — диаметр апертуры рефлектора.

Таблица 1

Выбранные линии излучения CO_2 -лазера и сечения поглощения отравляющих газов

Отравляющее вещество	Льюизит	Зарин	Зоман	Табун	Ви-икс (VX)	Циклозарин
Тип перехода и длина волны λ_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 λ_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
$\sigma_1 \cdot 10^{-22}, \text{ м}^2$	0,12	1,093	1,268	0,753	0,802	0,726
$\sigma_2 \cdot 10^{-22}, \text{ м}^2$	0,007	0,037	0,068	0,068	0,055	0,027
$\sigma_{12} \cdot 10^{-22}, \text{ м}^2$	0,113	1,056	1,2	0,685	0,747	0,699

Рассмотрим режим измерений, в котором регистрируются эхосигналы, диффузно отраженные от различных топографических объектов. При этом возможно определение усредненных концентраций газов на длинных трассах по отдельным направлениям, соответствующим азимуту топомии-

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

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

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 [6, 7], т. е.

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

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

Эквивалентная мощность шума P_{ne} выражается через площадь приемной площадки детектора A_d и обнаружительную способность детектора D^* , т. е. имеем

$$P_{ne} = \frac{\sqrt{A_d}}{D^*}.$$

Обнаружительная способность в свою очередь записывается как

$$D^* = \frac{\eta e}{h\nu} \sqrt{\frac{A_d}{2e I_d}}.$$

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

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

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

Результаты расчетов

Рассмотрим традиционную схему биаксиально-го СО₂-лидара. Для моделирования достижимой дальности зондирования принимались технические характеристики лидара, близкие к характеристикам, приведенным в работах [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. 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 $2\varphi = 1,5$ мрад; оптическая эффективность приемника $K_2 = 0,8$; ширина полосы пропускания $B = 30$ МГц; расстояние между осями передатчика и приемника $b_0 = 400$ мм; угол схождения осей передатчика и приемника $\psi = 0$ мрад. Отражательная способность тополишенной выбиралась равной $0,01$ стр⁻¹, диаметр апертуры рефлектора 150 мм, а его отражательная способность $K_3 = 0,5$ [7].

В качестве детектора в приемнике лидарной системы рассмотрим фотодиод HgMnTe со следующими параметрами: обнаружительная способность $D^* = 2 \cdot 10^{11}$ см·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 $\alpha_a = 0,03047$ км⁻¹ и яркость фонового излучения $B_a(\lambda) = 10^{-4}$ Вт/(см²·стр·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 одноминутной экспозиции [1].

На рис. 2 представлены рассчитанные зависимости отношения сигнал/шум ε от дальности для каждого отравляющего газа. Кривые построены для случая регистрации одиночных лидарных эхосигналов. Из рис. 2 можно определить предельные дальности эхолокации при $\varepsilon = 1$ для каждого из отравляющих веществ, так, для табуна ~ 0,8, люизита ~ 1,7, зарина ~ 2,2, циклозарина ~ 3,1, VX ~ 3,9 и зомана ~ 4,7 км.

С переходом в режим работы по зеркальному отражателю значения предельных дальностей, ес-

тественно, возрастают и составляют для табуна ~ 1,5 км, люизита ~ 3,3, зарина ~ 4,1, циклозарина ~ 5,9, VX ~ 7,4 и зомана ~ 8,8 км.

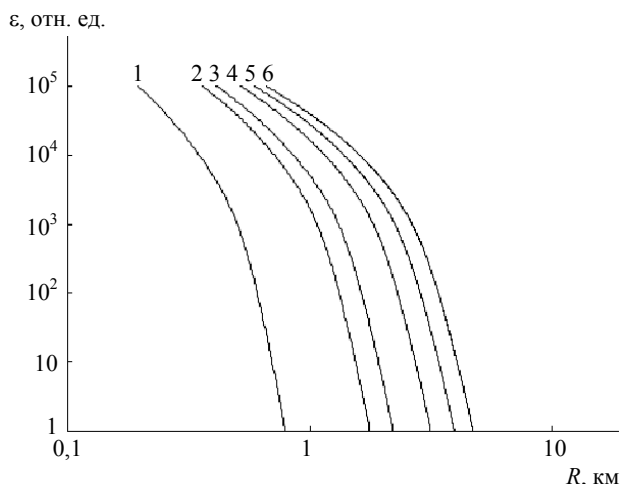


Рис. 2. Зависимости отношения сигнал/шум от расстояния при регистрации единичного лидарного сигнала для: 1 — табуна, 2 — люизита, 3 — зарина, 4 — циклозарина, 5 — VX, 6 — зомана

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 м² приводит к незначительному возрастанию дальности зондирования. Так, при увеличении площади приемного телескопа с 0,1 до 1 м² возрастание дальности зондирования составляет: для табуна ~11,6, люизита ~12,6, зарина ~12,9, циклозарина ~13,4, VX ~13,8 и зомана ~14,1 %.

Авторами 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 [6]. При увеличении угла зрения приемника мощность эхосигналов не меняется, однако увеличивается мощность фоновое излучения, падающая на детектор, что отражается на отношении сигнал/шум ε и дальности зондирования.

Полагалось, что отношение между углом зрения приемника лидара и расходимостью зондирующего пучка $\varphi/\theta = 1,5$ неизменно. В диапазоне от 1 до 2—3 мрад зависимость от угла зрения приемника практически отсутствует, затем при увеличении угла зрения дальность эхолокации начинает

падать, это справедливо для всех исследуемых отравляющих веществ.

В режиме работы по зеркальному отражателю при увеличении угла зрения дальность эхолокации лидара остается неизменной для люизита, зарина и табуна, а для зомана, VX и циклозарина дальность эхолокации также падает.

Рассмотрим влияние энергетических характеристик лазера на дальность зондирования (рис. 3). При увеличении энергии импульсов и пиковой мощности дальность зондирования возрастает, причем эта зависимость хорошо описывается эмпирическим уравнением

$$R_i(W) = A_i \ln(W) + B_i, \quad (4)$$

где R_i — дальность эхолокации при условии $\varepsilon = 1$; $i = 1 - 6$ — тип отравляющего вещества.

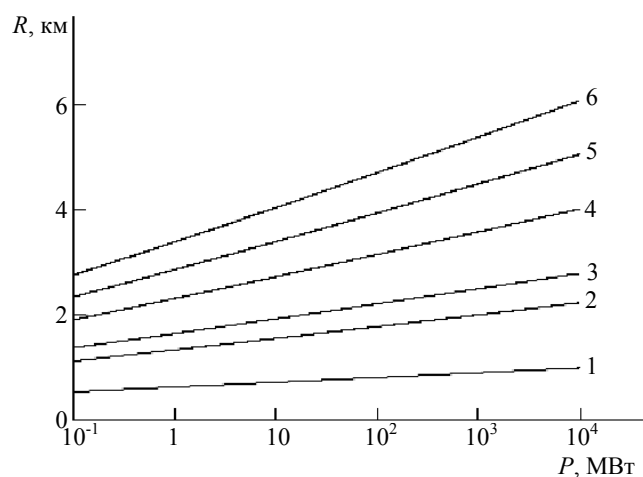


Рис. 3. Расчетные зависимости дальности эхолокации от пиковой мощности зондирующих импульсов при $\varepsilon = 1$ для: 1 — табуна, 2 — люизита, 3 — зарина, 4 — циклозарина, 5 — VX, 6 — зомана

Значения числовых коэффициентов A_i и B_i , а также их среднеквадратичные отклонения σ для каждого отравляющего вещества приведены в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициенты уравнения (4) и значения среднеквадратичного отклонения

Параметры	Люизит	Зарин	Зоман	Табуна	VX	Циклозарин
A	0,097	0,124	0,29	0,039	0,237	0,184
B	1,329	1,639	3,386	0,62	2,857	2,309
σ	0,009	0,008	0,014	0,004	0,011	0,009

Коэффициент детерминации R^2 , равный доле дисперсии зависимой переменной, связанной с вариаций независимой переменной для каждого отравляющего вещества, составляет 0,999.

Из рис. 3 следует, что десятикратное увеличение пиковой мощности приводит к незначительному возрастанию дальности зондирования. Так, возрастание дальности эхолокации при работе по топографическому отражателю при увеличении пиковой мощности импульсов со 100 до 1000 МВт составляет для табуна ~11,6, люизита ~12,9, зарины ~13,2, циклозарина ~13,8, VX ~14,2, зомана ~14,5 %, соответственно.

Увеличение энергетических параметров лазеров по сравнению с реализованными ранее в работах [7, 8] 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 эхолокации, что является дополнительным фактором, указывающим на отсутствие необходимости использования сложных в эксплуатации и громоздких мощных лазеров.

Рассмотрим влияние концентрации отравляющего вещества в атмосфере на дальность зондирования. В приведенных 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. 4 приведены расчетные зависимости дальности зондирования от концентрации отравляющих веществ в атмосфере при условии $\epsilon = 1$. Как видно из рис. 4, с уменьшением атмосферного ослабления, связанного с концентрацией, дальность зондирования возрастает. 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 (млн^{-1}) приведены в табл. 3.

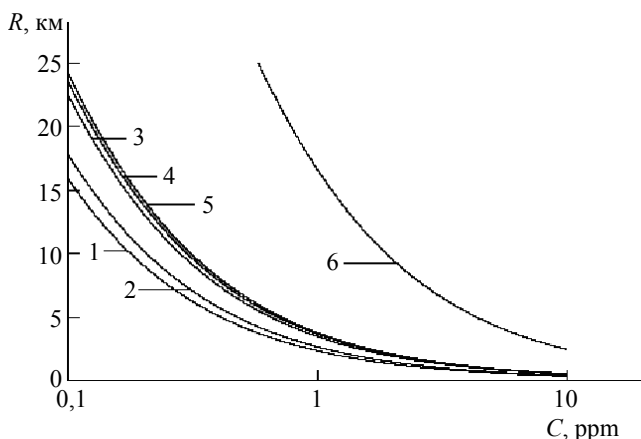


Рис. 4. Зависимости дальности эхолокации от концентрации: 1 — зомана, 2 — зарины, 3 — VX, 4 — табуна, 5 — циклозарина, 6 — люизита при $\epsilon = 1$

Таблица 3

Дальность зондирования при концентрации газов $C = 1 \text{ ppm}$

Параметр	Зоман	Зарин	VX	Табун	Циклозарин	Люизит
Дальность зондирования, км	~2,2	~2,5	~3,4	~3,5	~3,7	~16

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]

$$\delta_N = \sqrt{\frac{\delta_1^2(R) + \delta_1^2(R + \Delta R) + \delta_2^2(R) + \delta_2^2(R + \Delta R)}{n(2\sigma_{12}C\Delta R)^2} + \delta_K^2 + \delta_F^2}, \quad (5)$$

где σ_{12} — дифференциальный коэффициент поглощения;

C — концентрации 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, возникающие из-за влияния мешающих газов.

Последние две величины не связаны с шумами детектора и относятся к систематическим погрешностям.

Проведем оценки относительной погрешности измерения концентраций отравляющих веществ в атмосфере согласно формуле (5), 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].

На рис. 5 представлены зависимости относительной погрешности измерения концентрации отравляющих веществ в атмосфере от дальности зондирования.

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 $\delta_N = 1$, приведены в табл. 4.

δ_N , отн. ед.

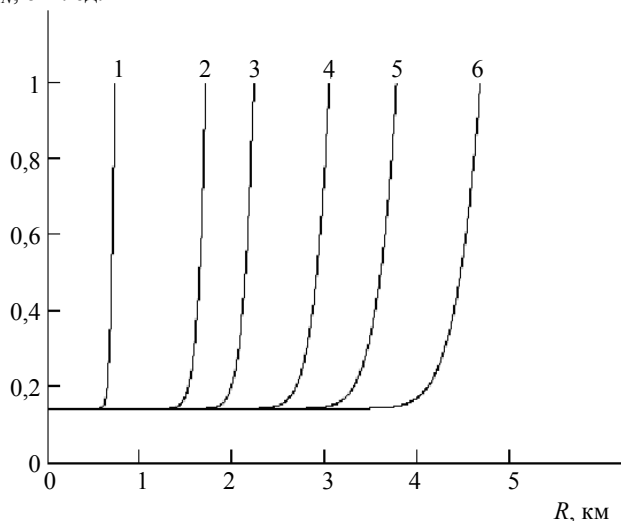


Рис. 5. Зависимости относительной погрешности измерений концентраций табуна (1), люизита (2), зарина (3), циклозарина (4), VX (5), зомана (6) в атмосфере от дальности зондирования

Таблица 4

Максимальные дальности зондирования, определенные по условию $\delta_N = 1$

Параметр	Табун	Люизит	Зарин	Цикло-зарин	VX	Зоман
Режим работы по топографическому отражателю						
Дальность зондирования, км	~0,7	~1,7	~2,2	~3	~3,8	~4,9
Режим работы по зеркальному отражателю						
Дальность зондирования, км	~1,4	~3,3	~4,1	~5,8	~7,2	~8,6

Заключение

Исходя из спектральной зависимости сечений поглощения наиболее распространенных и опасных отравляющих газов перспективными для их обнаружения являются лидары на основе CO₂-лазеров, работающие по дифференциальной методике. Выбраны подходящие для зондирования пары

линий излучения CO₂-лазера. Проанализировано влияние угла зрения и апертуры приемной системы на 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 показали, что возможно зондирование отравляющих газов при их концентрации, составляющей 10 % от предельной, с использованием диффузного и зеркального отражений от тополищевой на расстояниях до ~5 и ~8,5 км, соответственно.

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

Литература

1. Webber M. E., Pushkarsky M., Patel C. K.// Journal of Applied Physics. 2005. V. 97. P. 113.
2. Струков О. Г., Фокин Е. А., Петрунин В. А., Завалишина И. В., Власова З. В.// Химическая и биологическая безопасность. 2004. № 5. С. 72.
3. Горобец В. А., Петухов В. О., Точицкий С. Я., Чураков В. В.// Квантовая электроника. 1995. Т. 22. № 5. С. 514.
4. Кольяков С. Ф., Малявкин Л. П.// Там же. 1988. Т. 15. № 1. С. 212.
5. Rothman L. S., Jacquemart D., Barbe A. et al.// Journal of quantitative spectroscopy & radiative transfer. 2005. V. 96. P. 139.
6. Межерис П. Лазерное дистанционное зондирование. — М.: Мир, 1987. С. 550.
7. Иващенко М. В., Шерстов И. В.// Квантовая электроника. 2000. № 30. С. 747.
8. Andreev Y. M., Geiko P. P., Sherstov I. V.// Proc. SPIE. 1999. V. 3983. P. 386.
9. Рогальский А. Инфракрасные детекторы. — Новосибирск: Наука. 2003. С. 636.

Статья поступила в редакцию 24 июля 2008 г.

The possibilities of remote sensing of toxic gases with CO₂-laser

P. P. Geiko, I. S. Popov

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

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