

Расчёт оптимальных параметров NH_3 - CO_2 -лидара

Б.И.Васильев, У.М.Маннун

Рассчитаны основные параметры лидара, в котором используются NH_3 - и CO_2 -лазеры: дальность действия, отношение сигнал/шум и чувствительность. Принцип действия лидара основан на регистрации дифференциального поглощения. Рассмотрены спектры поглощения всех известных фреонов в спектральном диапазоне 9–13.5 мкм и определены оптимальные длины волн, подходящие для их зондирования. Показано, что NH_3 - CO_2 -лидар может зондировать фреоны на расстоянии вплоть до 10 км при отношении сигнал/шум больше 10. Проведён расчёт чувствительности лидара при зондировании фреона-11 с помощью разных линий аммиачного лазера. Показано, что можно зондировать фреон-11 при концентрации порядка $5 \times 10^{-6} \%$ на расстоянии вплоть до 8.5 км.

Ключевые слова: NH_3 - CO_2 -лидар, дифференциальное поглощение, фреоны.

1. Введение

Создание мощного аммиачного лазера [1], спектр генерации которого лежит в диапазоне 11–13.5 мкм, открыло новые возможности для зондирования атмосферы в окне прозрачности 8–14 мкм. Впервые использовать аммиачный лазер для лидарных систем было предложено в работе [2]. В дальнейшем в работе [3] был рассмотрен лидар на основе NH_3 -лазера с неселективным резонатором, одновременно работающий на нескольких линиях в диапазоне 11–13 мкм, что несомненно является его преимуществом. Однако в таком режиме работы лазера число линий ограничено и энергия каждой из них ниже, чем в лазере с селективным резонатором, что сокращает число детектируемых газов и дальность зондирования. В работе [4] была предложена оптическая схема двухчастотного аммиачного лидара, но система управления лазерными пучками оказалась не очень практичной, особенно для мобильных лидаров. Для решения этой проблемы в [5] использовалась оптическая схема излучателя двухчастотного аммиачного лидара, в которой выходные лазерные пучки аммиачного лазера, являются коллинеарными и управлять ими проще. Для перекрытия спектрального диапазона 9–13.5 мкм в работе [6] была предложена новая оптическая схема двухчастотного излучателя на основе CO_2 - и NH_3 -лазеров.

Для зондирования атмосферы в окне прозрачности 8–14 мкм самым популярным является лидар дифференциального поглощения (ЛДП) на основе CO_2 -лазера, который использовался разными научными группами [7–9]. В диапазон перестройки CO_2 -лазера ($\lambda = 9–11$ мкм) попадают линии поглощения более 90 различных газов, в том числе NH_3 , C_2H_2 , H_2O , O_3 , CO_2 , N_2O , NO_2 , HNO_3 ,

SF_6 , OSC , CS_2 , гидрозина, ракетного топлива и боевых отравляющих веществ [10]. Дополнительное использование аммиачного лазера ($\lambda = 11–13.5$ мкм) расширяет возможности зондирования ЛДП в окне прозрачности атмосферы 8–14 мкм. Именно в этот диапазон попадают сильные полосы поглощения многих газов, недоступных для регистрации с помощью CO_2 -лазера, таких как фреоны, органические газы и ядовитые вещества [11].

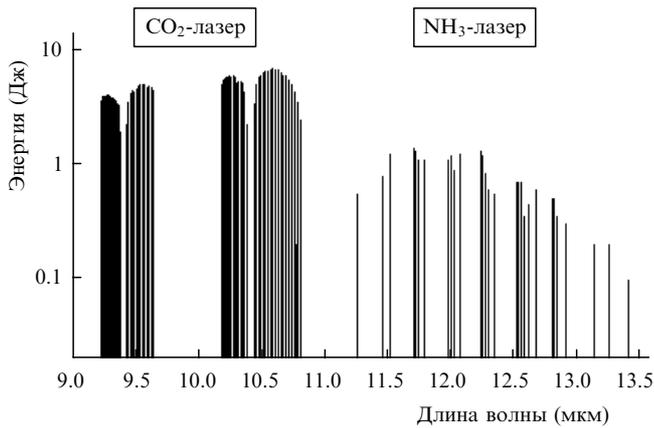
В настоящей работе рассмотрены основные параметры ЛДП, в котором использовались NH_3 - и CO_2 -лазеры (дальность действия, отношение сигнал/шум и чувствительность) [6]. Исследование параметров лидара проводилось только в диапазоне генерации NH_3 -лазера. Для сравнения использовались параметры лидара в области генерации CO_2 -лазера, оптимизированные в работах [12–15].

2. Описание лидара

Для зондирования атмосферы NH_3 - CO_2 -лидаром используется метод дифференциального поглощения (МДП). Этот метод основан на резонансном поглощении исследуемого газа, концентрация которого вычисляется при регистрации двух сигналов на двух длинах волн, одна из которых находится внутри линии поглощения исследуемого газа ($\lambda_{\text{он}}$), а другая вне её ($\lambda_{\text{офф}}$). Существуют две схемы работы ЛДП: в первой применяется топографический отражатель или зеркальный ретрорефлектор, а во второй в качестве отражателя используется атмосферный аэрозоль. Мы рассмотрим только вторую схему, позволяющую измерить концентрацию исследуемого газа с пространственным разрешением.

Спектры генерации NH_3 - и CO_2 -лазеров, представленные на рис. 1, показывают, что энергия импульса CO_2 -лазера ненамного больше энергии импульса аммиачного лазера. Это различие объясняется высоким КПД аммиачного лазера, максимальное значение которого составляет 21 % для линии $\text{aP}(4, 0)$ ($\lambda = 11.71209$ мкм) [1]. Аммиачный лазер накачивается излучением CO_2 -лазера (линия $9\text{R}(30)$, $\lambda = 9.22$ мкм) и генерирует в диапазоне

Б.И.Васильев. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: bvasil@sci.lebedev.ru
У.М.Маннун. Московский физико-технический институт (государственный университет), Россия, 141700 Долгопрудный, Московская обл., Институтский пер., 9

Рис.1. Спектр генерации NH₃-CO₂-излучателя.

11–13.5 мкм более чем на 30 линиях. Для реализации МДП в качестве опорной линии ($\lambda_{\text{оп}}$) используется линия 9R(30) CO₂-лазера, а в качестве зондирующей ($\lambda_{\text{он}}$) – любая линия NH₃-лазера.

Заметим, что CO₂-лазер генерирует более 60 линий, которые тоже могут применяться для зондирования. Оптическая схема, предложенная в [6], позволяет использовать одновременно NH₃- и CO₂-лазеры, работающие в диапазонах 11–13.5 мкм и 9–11 мкм соответственно. В CO₂-лазере в качестве выходного зеркала применяется интерферометр Майкельсона, отражатели которого являются дифракционными решетками, поэтому для реализации МДП необходимо настроить выходные дифракционные решетки интерферометра Майкельсона одновременно на две линии с $\lambda_{\text{он}}$ и $\lambda_{\text{оп}}$.

В табл.1 представлены все известные фреоны, имеющие полосы поглощения в диапазоне генерации аммиачного лазера, оптимальные линии для зондирования этих фреонов и сечения поглощения фреонов на них. Данные табл.1 заимствованы из атласа HITRAN-2000 [11]. Расчет сечений поглощения был проведен в атмосфере при температуре 296 К и давлении 1 атм. Следует отметить, что фреон-11 и фреон-12 имеют спектры поглощения и в диапазоне генерации CO₂-лазера, поэтому эти газы были зондированы лидарами на основе CO₂-лазера [16]. Однако сечения поглощения указанных газов в этом диапазоне в четыре раза меньше, чем в диапазоне генерации

аммиачного лазера [11], откуда следует, что применение лидара в спектральном диапазоне 11–13.5 мкм является более эффективным.

Аммиачный лазер обладает важной для зондирования атмосферы особенностью – малой шириной линии генерации. Известно, что ширина линии усиления $\Delta\nu$ аммиачного лазера задается следующим выражением [17]:

$$\Delta\nu = 28p_{\text{NH}_3} + 3.8p_{\text{N}_2},$$

где $\Delta\nu$ измеряется в мегагерцах, а давление p_i – в торрах. Для оптимального состава активной смеси аммиачного лазера NH₃:N₂ = 1:75 при суммарном давлении 60 Тор имеем $\Delta\nu = 247$ МГц. Для ТЕА CO₂-лазера ширина линии усиления меняется в пределах 3–4 ГГц в зависимости от состава смеси и её давления.

Основными естественными мешающими газами, которые могут присутствовать в атмосфере при зондировании в области 9–13.5 мкм, являются газы O₃, C₂H₄, NH₃, CO₂ и H₂O. В области генерации аммиачного лазера этилен (C₂H₄) не имеет полосы поглощения, а его сечение поглощения в области генерации CO₂-лазера меняется в пределах 0.1–32 см⁻¹·атм⁻¹ [11, 18]. Максимальные сечения поглощения озона и аммиака [19] в области генерации CO₂-лазера примерно в два раза больше, чем в области генерации аммиачного лазера [11]. Для водяного пара различие этих сечений везде, за исключением области вблизи $\lambda = 11.7$ мкм, где коэффициент ослабления атмосферой на линии aP(4, 2) составляет 0.446 км⁻¹, незначительно. Пропускание атмосферой на краю используемого окна прозрачности при $\lambda > 13$ мкм мало и определяется поглощением углекислым газом. Поэтому коэффициент ослабления атмосферой на линиях aP(9, 7) и aP(7, 3) равен 0.9552 и 0.9953 км⁻¹ соответственно [20]. На остальных линиях аммиачного лазера пропускание атмосферой сравнимо с пропусканием излучения CO₂-лазера.

3. Основные лидарные уравнения

3.1. Лидарный сигнал

В приближении однократного упругого рассеяния лидарное уравнение имеет следующий вид [21]:

Табл.1.

Газ	Химическая формула	Спектральный диапазон (мкм)	Линия NH ₃ -лазера	Сечение поглощения (см ⁻¹ ·атм ⁻¹)
Фреон-11	CCl ₃ F	11.364–12.346	sP(6, K)	115.7
Фреон-12	CCl ₂ F ₂	10.526–11.765	aP(3, 1)	6.55
Фреон-13	CClF ₃	12.423–13.072	aP(7, 4)	5.77
Фреон-21	CHCl ₂ F	11.905–12.739	aP(6, 3)	25.11
Фреон-22	CHClF ₂	11.628–13.158	aP(6, 0)	17.64
Фреон-113	C ₂ Cl ₃ F ₃	10.050–12.812	aP(6, 2)	36.35
Фреон-114	C ₂ Cl ₂ F ₄	11.628–12.270	aP(4, 0)	22.52
Фреон-123	CF ₃ CHCl ₂	11.111–13.515	aP(5, 2)	16.09
Фреон-124	CHClF ₂ CF ₃	10.869–12.657	aP(6, 4)	5.53
Фреон-125	CHF ₂ CF ₃	11.236–11.905	sP(5, K)	11.3
Фреон-141	CH ₃ CCl ₂ F	12.658–14.085	aP(9, 6)	27.26
Фреон-142	CH ₃ CClF ₂	7.905–11.429	sP(4, K)	6.4
Фреон-143	CF ₃ CH ₃	9.525–13.334	aP(5, 4)	3.58
Фреон-152	CH ₃ CHF ₂	10.050–11.905	aP(7, 1)	2.74
Фреон-225	CClF ₂ CF ₂ CHClF	11.561–14.389	aP(5, 1)	11.13

$$P_{\lambda}(z) = P_0 \frac{c\tau_p}{2} \eta_a(\lambda) \frac{A_t(z)}{z^2} \beta_{\lambda}(z) \exp \left[-2 \int_0^z \alpha_{\lambda}(\xi) d\xi \right], \quad (1)$$

где z – расстояние до рассеивающего объёма (дальность); c – скорость света; τ_p – длительность лазерного импульса; P_{λ} – мощность рассеянного излучения; P_0 – мощность лазера; η_a – эффективность приёмника; β_{λ} – объёмный коэффициент обратного рассеяния атмосферы; A_t – эффективная площадь приёмника; α_{λ} – объёмный коэффициент ослабления (экстинкция) атмосферой. Эффективность приёмника η_a определяется пропусканием передающей (q_t) и приёмной (q_r) оптики и эффективностью фотоприёмника χ : $\eta_a = q_t q_r \chi (1 - q_i)$, где q_i – прочие потери в приёмно-передающем тракте.

Коэффициент ослабления α_{λ} можно представить в виде суммы членов, описывающих молекулярное ($\alpha_{\lambda}^{\text{mol}}$) и аэрозольное ($\alpha_{\lambda}^{\text{aer}}$) ослабление: $\alpha_{\lambda} = \alpha_{\lambda}^{\text{aer}} + \alpha_{\lambda}^{\text{mol}}$. Коэффициент молекулярного ослабления $\alpha_{\lambda}^{\text{mol}}$ включает в себя ослабление за счет поглощения исследуемым газом ($\alpha_{\lambda}^g = N_g \sigma_{\lambda}^g$, где N_g – концентрация газа, а σ_{λ}^g – его сечение поглощения на длине волны λ). Коэффициент обратного рассеяния β_{λ} также можно представить в виде суммы двух членов, описывающих молекулярное ($\beta_{\lambda}^{\text{mol}}$) и аэрозольное ($\beta_{\lambda}^{\text{aer}}$) рассеяние: $\beta_{\lambda} = \beta_{\lambda}^{\text{aer}} + \beta_{\lambda}^{\text{mol}}$. Коэффициенты молекулярного рассеяния $\beta_{\lambda}^{\text{mol}}$ и молекулярного ослабления $\alpha_{\lambda}^{\text{mol}}$ можно рассчитать с хорошей точностью на основе либо теории рассеяния Рэлея [22], либо модели атмосферы, предложенной в [20, 23]. Коэффициенты аэрозольного рассеяния $\beta_{\lambda}^{\text{aer}}$ и аэрозольного ослабления $\alpha_{\lambda}^{\text{aer}}$ можно определить либо теоретически на основе теории аэрозольного рассеяния (теория Ми) [22], либо экспериментально по лидарным сигналам, используя алгоритм решения лидарного уравнения [24].

Эффективная площадь приемника $A_t(z)$ задаётся следующим выражением [21]:

$$A_t(z) = \frac{A_0}{\pi W^2(z)} \times \int_{r=0}^{r_1} \int_{\psi=0}^{2\pi} \xi(z, r, \psi) F(z, r, \psi) r dr d\psi = A_0 \xi(z), \quad (2)$$

где $F(z, r, \psi)$ – функция распределения лазерного излучения; $\xi(z, r, \psi)$ – геометрический вероятностный коэффициент; $W(z)$ – размер лазерного пятна на расстоянии z (в плоскости объекта); A_0 – площадь входной апертуры телескопа; $\xi(z)$ – функция геометрического фактора лидара, учитывающая долю отраженного от мишени лазерного пучка; r_1 – диаметр входной апертуры телескопа; r и ψ – полярные координаты.

3.2. Отношение сигнал/шум

В нашем лидаре, где используется прямое детектирование и где дробовой шум детектора является основным ограничивающим фактором, отношение сигнал/шум вычисляется по формуле [21]

$$\text{SNR} = \frac{P_{\lambda}}{[2B(P_f + P_{\lambda})h\nu/\eta + BP_d^2]^{1/2}}, \quad (3)$$

где η – квантовая эффективность детектора; $h\nu$ – энергия фотона; P_d – мощность, эквивалентная мощности шума детектора; B – ширина электронной полосы пропускания детектора; P_f – мощность фонового излучения атмосферы.

Выражения для мощности, эквивалентной шуму детектора, и мощности фонового излучения атмосферы имеют вид [21]

$$P_d = \frac{\sqrt{S_d}}{D^*}, \quad (4)$$

$$P_f = B_{\lambda} A_0 q_r \pi \theta_1^2 \Delta\lambda, \quad (5)$$

где S_d – площадь чувствительной площадки детектора; D^* – обнаружительная способность детектора; $2\theta_1$ – угол поля зрения телескопа; $\Delta\lambda$ – ширина пропускания светофильтра; B_{λ} – спектральная яркость фона атмосферы, изменяющаяся от 1 до 300 Вт·м⁻²·ср⁻¹·мкм⁻¹ [25].

3.3. Чувствительность лидара

Чувствительность лидара S – это минимальная концентрация газа, измеряемая лидаром с определенным пространственным разрешением для определенной дальности при относительной погрешности, равной 100%. Классическая формула для относительной погрешности δN определения средней концентрации газа методом дифференциального поглощения в некотором пространственном интервале имеет вид [26]

$$\delta N = \frac{1}{2\Delta\sigma\Delta R} \left[\frac{2}{N_p} (\delta_{\text{on}}^2 + \delta_{\text{off}}^2) + \delta_S^2 \right]^{1/2}, \quad (6)$$

где ΔR – пространственное разрешение лидара, минимальное значение которого определяется длительностью лазерного зондирующего импульса ($\Delta R = c\tau_p/2$); N_p – число импульсов в серии; δ_{on} и δ_{off} – случайные погрешности регистраций сигналов на длинах волн λ_{on} и λ_{off} ; δ_S – систематическая погрешность, не связанная с шумами детектора; $\Delta\sigma = \sigma(\lambda_{\text{on}}) - \sigma(\lambda_{\text{off}}) = \sigma_{\text{on}} - \sigma_{\text{off}}$ – дифференциальное сечение поглощения исследуемого газа; σ_{on} и σ_{off} – коэффициенты поглощения внутри и вне линии поглощения соответственно. Обычно δ_{on} и δ_{off} вычисляются через отношение сигнал/шум. Выражение для систематической погрешности имеет вид [27]

$$\delta_S^2 = 2(\delta_{\beta_{\text{aer}}}^2 + \delta_{\beta_{\text{mol}}}^2) \left(\frac{\beta_{\text{off}}^{\text{aer}} \beta_{\text{on}}^{\text{mol}} - \beta_{\text{on}}^{\text{aer}} \beta_{\text{off}}^{\text{mol}}}{\beta_{\text{off}} \beta_{\text{on}}} \right) + (2\Delta R)^2 [(\alpha_{\text{on}}^{\text{aer}} - \alpha_{\text{off}}^{\text{aer}})^2 \delta_{\alpha_{\text{aer}}}^2 + (\alpha_{\text{on}}^{\text{mol}} - \alpha_{\text{off}}^{\text{mol}})^2 \delta_{\alpha_{\text{mol}}}^2] + (2\Delta R)^2 \sum_{j=1}^M (\Delta\sigma_j^2 \delta_{N_j}^2 + \delta_{\Delta\sigma_j}^2 N_j^2) + (2\Delta\sigma\Delta R)^2 \delta_{\Delta\sigma}^2, \quad (7)$$

где $\delta_{\beta_{\text{aer}}}$ и $\delta_{\beta_{\text{mol}}}$ – относительные погрешности определения коэффициентов обратного рассеяния частицами аэрозоля и молекулами атмосферы; $\delta_{\alpha_{\text{aer}}}$ и $\delta_{\alpha_{\text{mol}}}$ – относительные погрешности, обусловленные поглощением лазерного излучения частицами аэрозоля и молекулами атмосферы; δ_{N_j} и $\delta_{\Delta\sigma_j}$ – относительные погрешности задания или определения концентрации j -го мешающего газа N_j и его дифференциального коэффициента поглощения $\Delta\sigma_j$; $\delta_{\Delta\sigma}$ – относительная погрешность задания или определения дифференциального коэффициента поглощения исследуемого газа.

Первые два слагаемых в соотношении (7) связаны с изменением рассеивающих свойств среды при перестройке длины волны. Третье слагаемое необходимо учитывать при наличии мешающих газов. Последнее слагае-

мое связано с погрешностью определения или задания сечения поглощения исследуемого газа.

4. Результаты расчетов

Основные технические параметры, используемые в наших расчетах, приведены ниже.

Излучатель	
Спектральный диапазон	9–11 мкм 11–13.5 мкм
Энергия импульса E_p	до 5 Дж до 1.5 Дж
Длительность импульса τ_p	1 мкс
Расходимость после расширителя	
пучка (телескопа)	0.8 мрад
Диаметр пучка на выходе расширителя	10 см
Эффективность расширителя пучка q_t	70 %

Телескоп	
Тип	телескоп Ньютона
Диаметр апертуры телескопа	40 см
Фокусное расстояние	1 м
Поле зрения $2\theta_t$	1 мрад
Расстояние между осями лазера	
и телескопа	50 см
Эффективность телескопа q_t	80 %

Детектор	
Тип	КРТ с охлаждением до 77 К
Размер чувствительной площадки	0.5 × 0.5 мм
Обнаружительная способность D^*	2×10^{11} см·Гц ^{1/2} ·Вт ⁻¹
Ширина пропускания светофильтра $\Delta\lambda$	4 нм
Ширина электронной полосы	
пропускания B	1 МГц
Эффективность χ	50 %
Постоянная времени	≤ 10 нс

Мы использовали также вертикальные профили концентраций газовых компонентов естественной атмосферы, которые представляются в виде различных статических моделей безоблачной атмосферы: тропической, среднеширотной летней, среднеширотной зимней, субарктической летней, субарктической зимней и стандартной. Из атласа AFGL/MODTRAN 3 [20] были взяты данные об этих профилях, а также о моделях стратификации температуры и давления. Для расчета функции геометрического фактора лидара мы использовали алгоритмы, предложенные в работе [28]. Спектральные данные газов заимствованы из атласа HITRAN-2000 [11].

4.1. Дальность действия лидара

Для определения дальности действия лидара мы рассчитали отношение сигнал/шум для разных линий аммиачного лазера, характеристики которых приведены в табл.2. Результаты расчетов, представленные на рис.2,

Табл.2.

Линия	λ (мкм)	E_p (Дж)	α_λ (км ⁻¹)
sP(2, 1)	10.7732	0.1	0.041
sP(5, K)	11.5207	1.25	0.062
aP(4,0)	11.7121	1.4	0.091
aP(4, 2)	11.7271	1.3	0.44
aP(7, 3)	12.5607	0.7	0.55

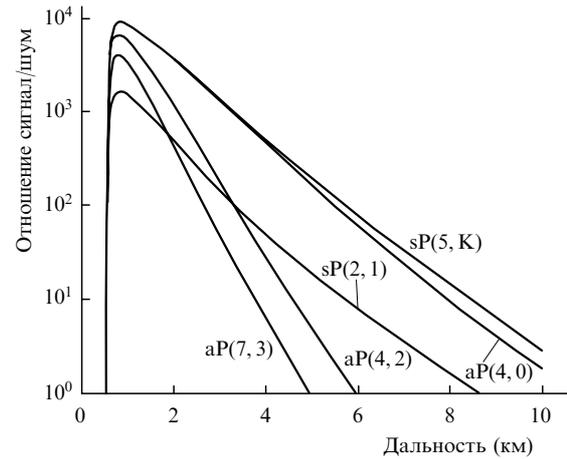


Рис.2. Отношение сигнал/шум для разных линий аммиачного лазера.

показывают, что лидар может зондировать атмосферу при отношении сигнал/шум больше 10 на расстоянии от 3.5 км (линия aP(7, 3)) до 8.5 км (линия sP(5, K)). Расчеты проводились при стандартной модели атмосферы на горизонтальной трассе на уровне моря, где средний коэффициент обратного аэрозольного рассеяния $\beta^{aer} = 2.17 \times 10^{-6}$ м⁻¹·ср⁻¹ [20].

Для исследования влияния условий атмосферы мы проводили расчет отношения сигнал/шум для самой сильной линии аммиачного лазера aP(4, 0) (энергия импульса $E_p = 1.4$ Дж и КПД лазера 21 %) при разных моделях атмосферы [20]. Результаты этих расчетов, приведённые на рис.3, показывают, что в тропической атмосфере дальность действия лидара минимальна и составляет 4.5 км при отношении сигнал/шум больше 10, а в субарктической зимней атмосфере она максимальна и достигает 10 км при таком же отношении сигнал/шум (в тех случаях, когда это отношение является достаточным для проведения измерений).

На основе приведённых выше результатов можно утверждать, что максимальная дальность зондирования аммиачного лидара R_{max} достигается в субарктической зимней атмосфере на линии sP(5, K), а минимальная дальность R_{min} – в тропической атмосфере на линии aP(7, 3). Наши расчеты показывают, что R_{min} и R_{max} при

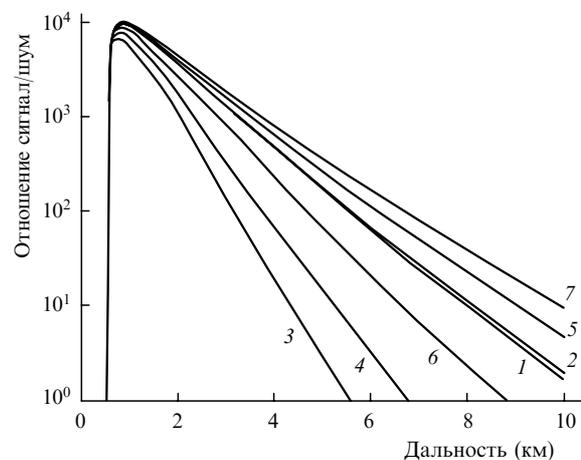


Рис.3. Отношение сигнал/шум для линии aP(4, 0) при разных моделях атмосферы: стандартной (1), при температуре 296 К и давлении 1 атм (2), тропической (3), среднеширотной летней (4), среднеширотной зимней (5), субарктической летней (6), субарктической зимней (7).

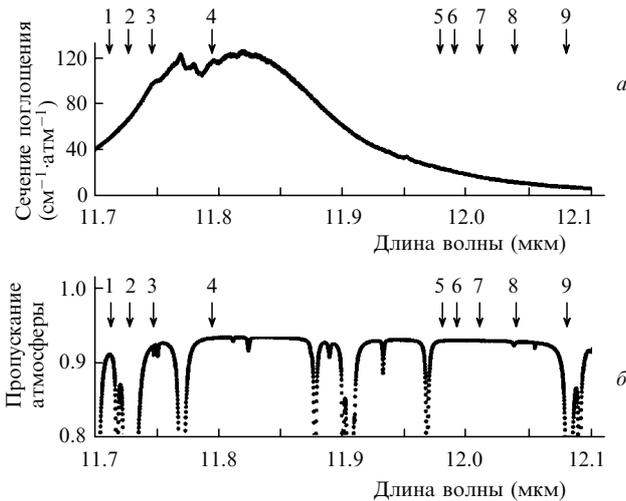


Рис.4. Спектр поглощения фреона-11 (а) и пропускание стандартной атмосферы на горизонтальной трассе длиной 1 км на уровне моря (б). Цифры у стрелок – номера линий в табл.3.

отношении сигнал/шум больше 10 составляют 2.5 и 10 км соответственно.

Следует отметить, что коэффициент обратного рассеяния β_λ в диапазоне генерации аммиачного лазера на уровне моря согласно [20] меняется от 1.9×10^{-6} до $2.5 \times 10^{-6} \text{ м}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$, а для CO₂-лазера он оказывается в 1.3 раза меньше. Согласно измерениям на разных линиях CO₂-лазера, проведённым в работе [29], коэффициент $\beta_\lambda = 5 \times 10^{-8} - 2.5 \times 10^{-7} \text{ м}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$, т.е. для аммиачного лазера β_λ оказывается в 10 раз больше, чем для CO₂-лазера. Однако это преимущество аммиачного лазера частично нивелируется невысокой чувствительностью детектора КРТ и малым пропусканием атмосферы.

4.2. Чувствительность лидара

Для определения чувствительности лидара мы провели расчет для молекул фреона-11, которые имеют сильную полосу поглощения в диапазоне 11.364–12.346 мкм (рис.4,а). На рис.4 стрелками указаны длины волн девяти линий аммиачного лазера, попадающие в этот интервал, на рис.4,б приведено пропускание стандартной атмосферы. В табл.3 представлены основные параметры этих линий. Из неё видно, что естественные мешающие газы имеют очень маленькие сечения поглощения, т.е. в выражении (7) можно не учитывать третье слагаемое. Согласно правилам выбора оптимальных длин волн [30], при зондировании фреона-11 можно сразу исключить линии sP(7, K) и aP(4, 2), коэффициент ослабления которых в стандартной атмосфере составляет 0.24 и 0.44 км⁻¹

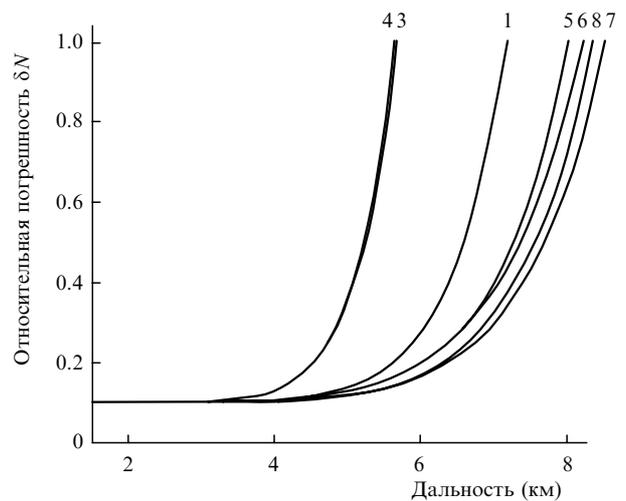


Рис.5. Относительная погрешность измерения концентраций фреона-11 на разных линиях аммиачного лазера. Цифры у кривых – номера линий в табл.3.

соответственно. Остальные линии, в принципе, можно использовать для зондирования фреона-11. Чувствительность лидара S на расстоянии 1 км (представленная в табл.3 для каждой линии) рассчитывалась при отношении сигнал/шум, равном 200 за один импульс. Видно, что минимальная концентрация, измеряемая лидаром на линии sP(6, K), равна $6 \times 10^{-7} \%$ при пространственном разрешении 67 м, что соответствует длительности лазерного импульса 446 нс. Сильные линии 3 и 4 (см. табл.3) можно использовать для зондирования небольших концентраций фреона-11 – порядка $8 \times 10^{-7} \%$ и $6 \times 10^{-7} \%$ соответственно, однако для зондирования концентраций, больших $7.2 \times 10^{-6} \%$ и $6 \times 10^{-6} \%$, этими линиями пользоваться невозможно из-за сильного ослабления ($\alpha_\lambda = 1.1 \text{ км}^{-1}$) лидарного сигнала, обусловленного поглощением самим фреоном-11. Слабые линии 5, 6, 7 и 8 подходят для зондирования больших концентраций – порядка $3 \times 10^{-5} \%$, $3.5 \times 10^{-5} \%$, $4.5 \times 10^{-5} \%$ и $6.5 \times 10^{-5} \%$ соответственно, а для зондирования концентраций, меньших $3.2 \times 10^{-6} \%$, $3.6 \times 10^{-6} \%$, $4.7 \times 10^{-6} \%$ и $7.1 \times 10^{-6} \%$, эти линии не используются из-за ослабления лидарного сигнала, обусловленного самой атмосферой.

Для определения погрешности зондирования на каждой линии из табл.3 мы использовали соотношение (6) при пространственном разрешении $\Delta R = 150 \text{ м}$, относительной систематической погрешности $\delta_S = 10 \%$ и числе импульсов усреднения лидарных сигналов $N_p = 10$. Результаты, представленные на рис.5, показывают, что дальность зондирования фреона-11 при $\delta_N = 1$ для силь-

Табл.3.

Номер линии	Линия	λ (мкм)	E_p (Дж)	α (км ⁻¹)	Сечение поглощения (см ⁻¹ ·атм ⁻¹)				S (10 ⁻⁷ %·км ⁻¹)
					фреон-11	O ₃	H ₂ O	CO ₂	
1	aP(4, 0)	11.71209	1.4	0.091	49.21	3.15×10^{-4}	1.16×10^{-4}	3.53×10^{-6}	1
2	aP(4, 2)	11.72713	1.3	0.44	66.22	7.27×10^{-4}	8.24×10^{-4}	3.64×10^{-6}	–
3	aP(4, 3)	11.74637	1.1	0.08	96.91	1.51×10^{-4}	9.7×10^{-5}	9.66×10^{-6}	0.5
4	sP(6, K)	11.79418	1.1	0.07	115.73	1.1×10^{-3}	7.82×10^{-5}	6.82×10^{-6}	0.4
5	aP(5, 1)	11.97859	0.9	0.073	23.12	1.03×10^{-3}	8.22×10^{-5}	4.97×10^{-6}	2
6	aP(5, 2)	11.99025	1.1	0.072	20.16	8.35×10^{-4}	8.03×10^{-5}	5.57×10^{-6}	2.5
7	aP(5, 3)	12.01008	1.2	0.076	15.6	1.2×10^{-3}	8.08×10^{-5}	1.28×10^{-5}	3
8	aP(5, 4)	12.03872	0.9	0.076	10.69	2.04×10^{-3}	8.72×10^{-5}	1.5×10^{-5}	5
9	sP(7, K)	12.07912	1.25	0.24	6.71	4.61×10^{-3}	3.63×10^{-4}	4.6×10^{-5}	–

ных линий 4 и 3 не превышает 5.5 км, а для слабых линий 5, 6, 7 и 8 составляет более 8 км. Хотя линия 1 относительно сильная ($E_p \approx 1.4$ Дж [1]), она может быть использована для зондирования на достаточно большом (порядка 7 км) расстоянии (рис.5).

5. Заключение

Таким образом, $\text{NH}_3\text{-CO}_2$ -лидар является очень чувствительным для зондирования различных веществ (фреоны, токсины, органические газы и ядовитые вещества). Обнаружение зондируемых веществ возможно на расстояниях от 2.5 до 10 км в зависимости от используемой линии генерации и состояния атмосферы. Большие сечения поглощения фреона-11 на линиях аммиачного лазера позволяют реализовать высокую чувствительность – вплоть до $4 \times 10^{-8} \%$ ·км⁻¹. Из формулы (7) следует, что концентрацию фреона-11 порядка $5 \times 10^{-6} \%$ можно измерить на расстояниях от 5 до 8 км с пространственным разрешением 150 м.

1. Васильев Б.И., Грасюк А.З. и др. *Квантовая электроника*, **7**, 116 (1980).
2. Васильев Б.И., Ястребков А.Б. *Изв. РАН. Сер. физич.*, **58**, 202 (1994).
3. Баранов В.Ю., Бобков И.В. и др. *Препринт ТРИНИТИ № 0043-А* (Троицк, 1998).
4. Ананьев В.Ю., Васильев Б.И. и др. *Квантовая электроника*, **30**, 535 (2000).
5. Васильев Б.И., Чо Чен Вхан. *Квантовая электроника*, **30**, 1105 (2000).
6. Васильев Б.И., Желтухин А.А., Маннун У.М. *Кр. сообщ. физ. ФИАН*, **7**, 22 (2004).
7. Кольяков С.Ф., Малявкин Л.П. *Квантовая электроника*, **15**, 212 (1988).
8. Andreev Yu.M., Geiko P.P., Sherstov I.V. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3983**, 386 (1999).
9. Menyuk N., Killinger D.K., De Feo W.E. *Appl. Opt.*, **24**, 2837 (1985).
10. Андреев Ю.М., Гейко П.П., Самаховалов И.В. *Оптика атмосферы и океана*, **16**, 783 (2003).
11. Rothman L.S., Barbe A., et al. *J. Quant. Spectr. Rad. Transfer*, **82**, 5 (2003).
12. Иващенко М.В., Шерстов И.В. *Квантовая электроника*, **30**, 747 (2000).
13. Killinger D.F., Menyuk N. *IEEE J. Quantum Electron.*, **17**, 1917 (1981).
14. Carlisle C.B., van der Laan J.E., et al. *Appl. Opt.*, **34**, 6187 (1995).
15. Killinger D.F., Menyuk N. *Opt. Lett.*, **6**, 301 (1981).
16. Murray E.R. *Opt. Eng.*, **16**, 284 (1977).
17. Васильев Б.И. *Докт. дис.* (М., ФИАН, 1997).
18. Murray E.R., van der Laan J.E. *Appl. Opt.*, **17**, 814 (1978).
19. Force A.P., Killinger D.K., De Feo W.E., Menyuk N. *Appl. Opt.*, **24**, 2837 (1985).
20. Maclatchey R.A., Fenn R.W., Selby G.E.A., Garing J.S., in *Optical Properties of the Atmosphere* (Bedford, Massachusetts: Air Force Cambridge Research Laboratories, 1970).
21. Межерис Р. *Лазерное дистанционное зондирование* (М.: Мир, 1987).
22. Van de Hulst H.C. *Light Scattering by Small Particles* (New York: John Wiley & Sons Inc., 1957).
23. Зуев В.Е., Креков Г.М. *Оптические модели атмосферы* (Л.: Гидрометеониздат, 1986).
24. Ansmann A., Riebesell M., et al. *Appl. Phys. B*, **55**, 18 (1992).
25. Криксунов Л.З. *Справочник по основам инфракрасной техники* (М.: Сов. радио, 1978).
26. Firsov K.M., Kataev M.Yu., Mitsel A.A., Ptashnik I.V., Zuev V.V. *J. Quant. Spectr. Rad. Transfer*, **61**, 25 (1999).
27. Зуев В.В., Рамоновский О.А. Деп. ВИНТИ № 4675-B87 от 25.06.87.
28. Halldorsson T., Langerholc J. *Appl. Opt.*, **17**, 240 (1978).
29. Ben-David A. *Appl. Opt.*, **38**, 2616 (1999).
30. Мицель А.А. *Оптика атмосферы и океана*, **5**, 978 (1992).