

Ю.М. Андреев, П.П. Гейко, И.В. Самохвалов*

Зондирование газовых загрязнений атмосферы методом дифференциального поглощения в ИК-области спектра

* *Томский государственный университет
Институт оптического мониторинга СО РАН, г. Томск*

Поступила в редакцию 4.06.2003 г.

Суммированы результаты разработок лидарных систем дифференциального поглощения на базе лазерных источников излучения собственного изготовления, выполненные ИОА СО РАН, СФТИ, ИОМ СО РАН и РФФ ТГУ за период с 1974 г. по настоящее время. Представлены результаты полевых испытаний лидаров-газоанализаторов и измерений газового состава атмосферы.

Введение

Известно, что максимум информации при дистанционном определении состава и состояния атмосферы с высоким пространственно-временным разрешением и чувствительностью можно получить лишь оптическими методами с использованием источников когерентного излучения. Наибольшие потенциальные возможности и наилучшие практические результаты в определении концентраций газовых компонентов дает реализация метода дифференциального поглощения в коротковолновой части среднего ИК-диапазона спектра 2,5–14 мкм. Именно здесь находятся интенсивные изолированные линии и спектральные структуры поглощения практически всех атмосферных газов, пригодные для проведения измерений. Привлекателен этот диапазон и для зондирования крупнодисперсных фракций естественных и промышленных аэрозолей. Комплексный же контроль аэрозолей атмосферы в идеале требует проведения измерений во всех окнах прозрачности диапазона 0,2–14 мкм. Ультрафиолетовая и прилегающая к нему часть видимого диапазона перспективны для контроля мелкодисперсных специальных и природных аэрозолей, а также некоторых газовых компонент, таких как O_3 , SO_2 , NO и других соединений азота. И наконец, субмиллиметровый и миллиметровый диапазоны спектра привлекательны для зондирования газового состава атмосферы благодаря наличию интенсивных спектрально разрешенных линий практически всех атмосферных газов.

На практике, в начальный период разработки средств зондирования (лидарных систем) силами ИОА СО РАН и РФФ ТГУ в первой половине 1970-х гг., освоение не только столь широкого диапазона, но и сколько-нибудь заметных его участков сдерживалось отсутствием необходимых источников излучения. Имеющиеся в наличии серийные твер-

дотельные, прежде всего рубиновые и неодимовые, лазеры позволили осуществить быструю разработку на их основе базовых вариантов аэрозольных лидаров. До начала 1980-х гг. промышленность и научные организации постепенно освоили производство перестраиваемых лазеров видимого диапазона на красителях, заметно продвинулись в разработке УФ эксимерных лазеров и преобразователей частоты лазеров видимого и ближнего ИК-диапазонов спектра в УФ-диапазон. Эти источники излучения сразу стали использоваться в разработках лидаров.

Наиболее сложная ситуация сложилась с освоением среднего ИК-диапазона. Здесь доступными оказались лишь CO_2 -лазеры, работающие в ограниченном диапазоне 9,2–10,8 мкм. Параллельно с их использованием происходило освоение суперсовременных, для своего времени, параметрических генераторов света (ПГС) на основе нелинейных кристаллов. Однако низкие эксплуатационные характеристики ПГС не позволили получить сколько-нибудь значимые результаты в анализе газовых компонентов реальной атмосферы. Именно трудности в оснащении необходимыми источниками излучения до сих пор тормозят создание лидаров-газоанализаторов среднего ИК-диапазона. Такая ситуация автоматически сделала приоритетной задачу разработки необходимых источников излучения собственными силами, в дальнейшем создание новых вариантов лидаров всегда следовало за завершением очередной разработки источников излучения.

Рассмотрим ход и ключевые результаты в создании лидаров-газоанализаторов среднего ИК-диапазона, промежуточные результаты разработки новых источников излучения для традиционных, а также перспективных фемтосекундных и переносных лидаров. Кратко рассмотрим метод дифференциального поглощения.

1. Метод дифференциального поглощения

В основе метода лежит самое эффективное взаимодействие оптического излучения с молекулами атмосферных газов — резонансное поглощение, что и определяет основные достоинства реализующих его технических средств: предельно высокую чувствительность измерений в масштабе реального времени, пространственно-разрешенное дистанционное измерение большой дальности действия. В зависимости от поставленной задачи в лидарах-газоанализаторах дифференциального поглощения фотоприемники регистрируют оптические экосигналы, отраженные зеркально специальными отражателями или диффузно топографическими объектами: деревьями, зданиями, холмами и т.д. Это трассовые измерители и так называемые ТТ-лидары, работающие по топографическим целям. Они определяют усредненные по трассе зондирования концентрации газовых компонентов путем сравнения сигналов, полученных на длине волны, совпадающей с линией поглощения и лежащей в соседнем окне прозрачности. В случае использования аэрозолей атмосферы в качестве распределенных отражателей говорят о лидарах дифференциального поглощения и рассеяния — DAS-лидарах, определяющих профили распределения концентраций контролируемых газов.

Мощность лидарного сигнала, отраженного аэрозолями атмосферы, определяется лидарным уравнением

$$P(\lambda, R) = P_L \frac{A_0}{R^2} \xi(\lambda) \beta(\lambda, R) G(\lambda, R) \frac{c\tau}{2} \times \exp\left(-2 \int_0^R k(\lambda, R') dR'\right), \quad (1)$$

где $P_L = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau P(t) dt$, $P(t)$ и τ — временное распределение мощности и длительность зондирующего импульса; A_0 — апертура приемного телескопа; R и $\beta(\lambda, R)$ — дальность и коэффициент обратного рассеяния от отражающего объема; $\xi(\lambda)$ — пропускание оптического тракта лидара; $k(\lambda, R)$ — общий коэффициент ослабления атмосферы, $G(\lambda, R)$ — геомет-

рический фактор лидара; $\exp\left(-2 \int_0^R k(R') dR'\right)$ — про-

пускание двойной трассы до отражающего объема. Для определения усредненных по трассам зондирования концентраций в уравнении (1) необходимо заменить множитель $\beta(\lambda, R)c\tau/2$ на ρ/π , где ρ — коэффициент отражения используемого отражателя или объекта. Общий коэффициент ослабления зондирующего излучения

$$k(R, \lambda) = N(R)\sigma(\lambda) + \kappa_c(\lambda, R) + \kappa_a(\lambda, R) + \sum_{i=1}^m k^{(i)}(\lambda), \quad (2)$$

где $N(R)$ и $\sigma(\lambda)$ — концентрация и сечение поглощения газа; $\kappa_c(\lambda, R)$ и $\kappa_a(\lambda, R)$ — коэффициент поглощения континуума воды и аэрозольного ослабления, под знаком суммы находится суммарный коэффициент поглощения возмущающих газов. В среднем ИК-диапазоне ослабление за счет молекулярного рассеяния мало в сравнении с коэффициентом аэрозольного ослабления. После взятия логарифма отношения мощностей зарегистрированных на частотах «вне» (λ_1) и «на» (λ_2) линии поглощения, его дифференцирования и в предположении проведения измерений в условиях замороженной атмосферы (время измерений менее 0,1 мс), когда коэффициенты аэрозольного рассеяния и континуального поглощения воды при трассах зондирования менее 3–5 км можно считать фиксированными функциями расстояния до лидара, среднее содержание газа в слое $\Delta R = R_2 - R_1$ (ppb) определится как

$$N(R_1, R_2) = \frac{1}{\Delta R} \int_{R_1}^{R_2} N(R') dR' = \frac{10^9}{2k_{12}\Delta R} \times \left[\ln \frac{P(\lambda_2, R_1)P(\lambda_1, R_2)}{P(\lambda_1, R_1)P(\lambda_2, R_2)} + \ln \frac{G(\lambda_1, R_1)G(\lambda_2, R_2)}{G(\lambda_1, R_2)G(\lambda_2, R_1)} - \Delta R \left\{ [k_c(\lambda_1) - k_c(\lambda_2)] + [k_a(\lambda_1) - k_a(\lambda_2)] + \sum_{i=1}^m k_{12}^{(i)} \right\} \right], \quad (3)$$

где $k_{12}^{(i)} = k^i(\lambda_1) - k^i(\lambda_2)$ — дифференциальный коэффициент поглощения i -го газа. Из-за принятия условия «замороженности» атмосферы дифференциальное сечение поглощения газов $\sigma_{12} = \sigma(\lambda_1) - \sigma(\lambda_2)$ заменено на дифференциальный коэффициент поглощения $k_{12} = \sigma_{12} N_L$, где N_L — число Лошмидта. В наших лидарных системах коэффициент дифференциального поглощения контролируемой и мешающих газовых компонент, а также коэффициент континуального поглощения паров воды определяются по имеющимся банкам данных спектральных параметров линий поглощения (например, HITRAN) с использованием данных о температуре и давлении атмосферы от используемых стандартных метеостанций. Коэффициенты аэрозольного ослабления выбираются по известным моделям атмосферы. Ошибка измерений определялась по выражению

$$\frac{\delta_N^2}{N^2} = \frac{1}{M} \left\{ \frac{\delta_\sigma^2}{\sigma_{12}^2} + \delta_B^2 + \delta_J^2 + \delta_C^2 + \delta_A^2 + \delta_F^2 + \frac{1}{4\sigma_{12}^2 N^2 \Delta R^2} \left[4 \frac{\delta_P^2 - \text{cov}[P(R), P(R + \Delta R)]}{P^2(R)} \right] \right\}, \quad (4)$$

где M — число лазерных импульсов; δ^2 — дисперсии различных параметров;

$$\begin{aligned} \text{cov}[P(R), P(R + \Delta R)] &= \\ &= 2\delta_p^2 \{ \sin(2\pi\Delta f 2\Delta R / c) / (2\pi\Delta f 2\Delta R / c) \} \end{aligned}$$

— ковариация лидарных сигналов с расстояния R , $R + \Delta R$; Δf — полоса приемного электронного тракта лидара, приняты обозначения

$$\begin{aligned} B &= \ln \frac{\beta_{11}\beta_{22}}{\beta_{12}\beta_{21}}; \quad J = \ln \frac{G_{11}G_{22}}{G_{12}G_{21}}; \quad C = -k_2^c \Delta R; \\ A &= -k_2^a \Delta R; \quad F = -\Delta R \sum_i k_{12}^{(i)}. \end{aligned} \quad (5)$$

Спектральная зависимость полного и обратного коэффициентов аэрозольного рассеяния от частоты ν лазерного излучения определялась как

$$\delta_A^2 = \bar{k}^a \left(4 \frac{\Delta\nu}{\nu} \right)^2 \Delta R^2 \quad \text{и} \quad \delta_B^2 = \left(4 \frac{\Delta\nu}{\nu} \right)^2. \quad (6)$$

Геометрический фактор тщательно рассчитывался методами геометрической оптики. Для проверки соответствия и исключения непредвиденных ошибок сигнал обратного рассеяния на длинах волн, не попадающих на линии поглощения газов, сравнивался с результатами оценок.

2. Трассовый измеритель на основе CO₂-лазера

Как следует из оценок по формуле (1), трассовые измерения с использованием зеркальных отражателей могут выполняться с помощью микроваттных источников излучения, измерения с использованием топографических — при энергии зондирующих импульсов от десятых долей до единиц миллджоулей. Пространственно разрешенные измерения возможны лишь при увеличении энергии импульсов до уровня долей и единиц, а то и десятков джоулей, при переходе из коротковолновой части средней ИК-области в область работы CO₂-лазеров. В 1970—1980-х гг. основные трудности создания газоанализаторов рассматриваемого диапазона заключались не только в проблеме изготовления перестраиваемых по частоте достаточно мощных и надежных источников излучения. Из-за отсутствия средств визуализации излучения и матричных детекторов наиболее сложной являлась проблема формирования и высокоточного контроля спектральных параметров узких линий излучения. Так, при работе в приземной атмосфере спектральная ширина линий излучения не должна превышать, по крайней мере, 1/3 ширины линий поглощения, что составляет 0,03—0,003 см⁻¹. Стабилизация и точность контроля положения центра линии должны характеризоваться еще меньшими величинами.

В наибольшей степени в это время для применения в лидарах подходили CO₂-лазеры. Из-за относительной простоты и надежности, высоких энергетических характеристик при гладком и квазиэквидистантном спектре излучения, а также высоких

эксплуатационных характеристик эти лазеры допускают разработку, сервисное обслуживание и модернизацию собственными силами.

Главными же достоинствами CO₂-лазеров являются отсутствие необходимости формирования и легкость контроля спектральных параметров излучения. При типичных давлениях рабочей смеси лазеров низкого давления порядка 18 торр спектральная ширина линий излучения, даже при отсутствии каких-либо средств стабилизации выходной мощности, длины резонатора и модового состава излучения, составляет всего около $2 \cdot 10^{-3}$ см⁻¹. При этом при обычной длине резонатора около 1 м и работе в TEM₀₀-моду в спектре излучения содержатся 3—4 продольные моды, нестабильность которых по амплитуде и частоте не влияет на результаты измерений из-за малой спектральной ширины линии излучения и наличия опорного канала в лидарах. Спектральное положение отдельных линий излучения фиксировано параметрами рабочей смеси и известно с чрезвычайно высокой точностью. Пятьдесят — девяносто линий генерации разнесены на 1,5—2 см⁻¹, что позволяет легко их селектировать и идентифицировать с помощью дифракционных решеток, управляемых шаговыми двигателями. В случае ТЕА CO₂-лазеров спектральная ширина линий излучения составляет приемлемую для работы в приземной атмосфере величину примерно 0,1 см⁻¹.

В диапазон перестройки CO₂-лазеров попадают линии поглощения более 90 различных газов, в том числе: NH₃, C₂H₂, пары H₂O, O₃, CO₂, N₂O, NO₂, HNO₃, SF₆, OSC, CS₂, фреоны, органические газы, гидрозин, ракетные топлива, боевые отравляющие газы. Практическую же значимость имеют, прежде всего, первые три низкомолекулярные компоненты. Благодаря высоким сечениям линий поглощения, хорошо спектрально совмещенных с линиями излучения, и высокому содержанию в атмосфере городов они могут быть проконтролированы с высокой точностью. Высокомолекулярные газы и пары веществ достаточно уверенно контролируются лишь в том случае, если их число не превышает нескольких единиц. Возможность контроля десятка таких компонент при их одновременном наличии в атмосфере крайне сомнительна из-за перекрытия сложных спектров поглощения отдельных газов. Отсюда очевидно, что главным недостатком CO₂-лазеров является ограниченный спектр излучения.

Возможности трассового измерителя на основе перестраиваемого CO₂-лазера низкого давления с использованием зеркального отражателя, созданного к 1974 г. по традиционной схеме параллельно зарубежным разработкам, описаны в работе [1]. При использовании линии 9P(8) точность измерения суточного хода изменения содержания O₃ составила 8—9 ppb при длине измерительной трассы 2,5 км, а этилена — 3 ppb с использованием линии 10P(14). Аммиак измерен с точностью около 1 ppb на линии 9R(30), проведено качественное измерение содержания бензола и акролеина в выбросах автомобилей [2]. К рабочим недостаткам этого

измерителя следует отнести низкую (0,1%) точность измерения электрических сигналов и отсутствие систем стабилизации длины резонатора, приводящие к срывам генерации и появлению двух–трех частотных режимов работы из-за разъюстировки резонатора. Первая попытка использования для газоанализа атмосферы ТЕА CO_2 -лазера не принесла ожидаемого результата из-за его низких технических параметров [3].

3. ТТ-лидар на основе параметрического генератора на CdSe

Первая известная нам по научной литературе лидарная система дифференциального поглощения, работающая в среднем ИК-диапазоне с использованием преобразователей частоты, была создана и испытана в 1977–1978 гг. [4]. В качестве источника излучения в ней использованы ПГС на CdSe с накачкой $\text{Er}^{3+}:\text{YAG}$ (2,96 мкм) и криогенным $\text{Dy}^{2+}:\text{CaF}_2$ (2,36 мкм) лазерами с двумя каскадами усиления, которые работали в диапазонах 2,8–4,2 и 7,5–13,7 мкм со спектральной шириной линии излучения 1 см^{-1} . При эффективности параметрической генерации в нелинейном монокристалле CdSe длиной 40 мм 1–10% пиковая мощность 30–40 нс импульсов излучения превышает 100 кВт при частоте следования до 10 Гц, а энергия составляет 3–4 мДж. Эти ПГС отвечают большинству требований, предъявляемых к лидарным источникам излучения, поэтому газоанализатор на его основе в первых же экспериментах продемонстрировал принципиальную возможность измерения концентраций NH_3 , CH_4 , CO и HCl на уровне ПДК при работе в ТТ-режиме и длине измерительных трасс 0,1–1,0 км. Однако двухлетняя эксплуатация ПГС показала их низкие эксплуатационные характеристики. Максимальная наработка на отказ не превысила нескольких сот импульсов.

Опыт эксплуатации первых двух разработанных лидаров показал привлекательность использования методов нелинейной кристаллооптики для расширения возможностей газоанализа. Низкая эффективность нелинейных кристаллов указала на необходимость поиска новых кристаллов, а сложность конструкции ПГС — на предпочтительность использования не пороговых преобразователей частоты, а именно генераторов второй и высших гармоник, а также смесителей частоты, прежде всего CO_2 -лазеров. Отметим, длина волны излучения CO_2 -лазера и его гармоник как раз совпадает с «окнами прозрачности» атмосферы в спектральных диапазонах 2,0–2,5; 3,0–4,2; 4,4–5,0 и 8–14 мкм.

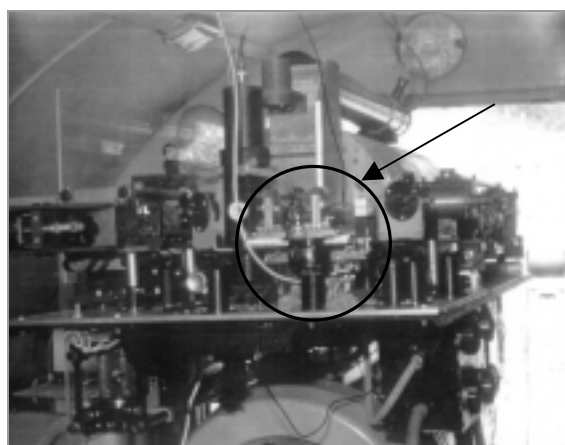
Дополнительным стимулирующим фактором в разработке генераторов гармоник является тот факт, что сопутствующее ухудшение энергетических параметров практически компенсируется увеличением чувствительности детекторов излучения. Так, потери энергии даже при относительно малой эффективности ГВГ порядка 10–20% практически компенсируются ростом чувствительности детекто-

ров 5-мкм диапазона на основе InSb. Она минимум в 5 раз выше, чем у HgCdTe-детекторов излучения CO_2 -лазеров (обнаружительная способность 10^{11} против $2 \cdot 10^{10} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2}/\text{Вт}$). Детекторы третьей гармоники из InAs в 5 раз превосходят по чувствительности детекторы второй гармоники на основе InSb.

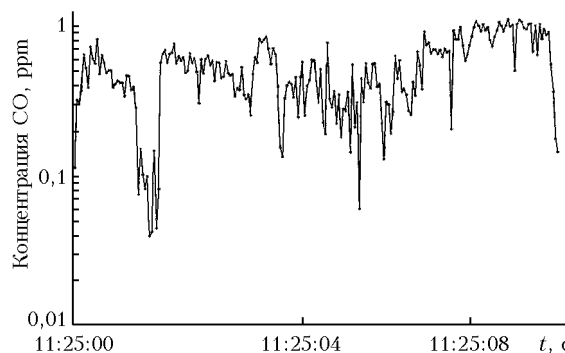
4. Трассовый измеритель на основе CO_2 -лазера с генератором второй гармоники

На рис. 1 представлен усовершенствованный вариант газоанализатора Резонанс-3 [3], смонтированного в автофургоне и снабженного удвоителем частоты на основе кристалла ZnGeP_2 , выращенного в СФТИ под руководством В.Г. Воеводина и впервые использованного в прикладных целях [5].

Двухмесячные полевые испытания подтвердили возросшие возможности и высокие эксплуатационные характеристики газоанализатора. Суточные ходы изменения содержания угарного газа измерены (рис. 1, б) на длине волны второй гармоники линии 9R(18) с центром на частоте $\nu = 2154,604 \text{ см}^{-1}$, совпадающей с линией поглощения R(2) основной полосы CO с центром при $\nu = 2154,596 \text{ см}^{-1}$ и коэффициентом поглощения $29,7 \text{ см}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$ [6].



а



б

Рис. 1. Внешний вид трассового газоанализатора с удвоителем частоты (показан стрелкой) из ZnGeP_2 (а), временной ход изменения концентрации CO на оживленной автотрассе, определенный на длинах волн второй гармоники

Отсутствие криогенного охлаждения $ZnGeP_2$, в отличие от используемых за рубежом монокристаллов $CdGeAs_2$, упростило конструкцию лидара, а большая лучевая стойкость обеспечила безотказную работу в течение многомесячных циклов измерений в полевых условиях. Этому способствовало применение МОП n - $InSb$ структур с низкой пороговой мощностью 10^{-13} Вт/Гц^{1/2} в качестве детекторов излучения при измерениях на длинах волн второй гармоники, позволившее работать с излучением на два—три порядка меньшей мощности, чем при использовании $InSb$ -фотодиодов. Полный перехват зондирующего луча приемной оптико-механической системой при удалении отражателя на расстояние до 1,5 км, установка газоанализатора на изолированные от кабины домкраты и большая, ($\varnothing 2$ мм) фоточувствительная площадка МОП структуры исключили влияние вибраций, турбулентности атмосферы и параллельного сдвига излучения ВГ при угловой подстройке кристаллов. При длине трассы 2 км точность измерений составила 4% от фоновой концентрации 100 ppb. Перед началом измерений производится калибровка пропускания измерителя путем установки выносного отражателя в непосредственной близости от приемопередатчика и измерения калибровочного коэффициента на рабочих длинах волн. Затем на трассу луча вносится кювета длиной 2 м с известным количеством исследуемого газа для уточнения, при необходимости, сечений поглощения и абсолютной калибровки измерителя.

Аппаратура регистрации и предварительной обработки данных на базе вычислительного комплекса работала в масштабе реального времени. Большое содержание и коэффициент поглощения угарного газа позволили произвести контроль его содержания с использованием топографических целей в качестве отражателей. CO_2 -лазер работал при этом в импульсно-периодическом режиме с частотой повторения 1 кГц и пиковой мощностью 1–3 кВт, его излучение удваивалось по частоте с 5%-й эффективностью. При использовании топографических объектов, удаленных на расстояние до 500 м, и применении криогенных фотодиодов $InSb$ реализуемое отношение сигнал-шум при накоплении за минуту достигло 100 и позволило контролировать фоновое и надфоновое содержание CO [7]. Установлено, что трассы длиной 20 м достаточно для такого контроля типичных для автострад уровней загрязнения.

В число газов, зондируемых на длинах волн второй гармоники, входит OCS с использованием линии поглощения на $2082,5596$ см⁻¹ с интенсивностью $1,17 \cdot 10^{-19}$ см²/(мол·см), совпадение со второй гармоникой линии излучения $9P(26)$ с точностью до 0,0013 см⁻¹, а также NO по дуплету линий поглощения на $1871,066$ и $1871,055$ см⁻¹ с интенсивностью $1,72 \cdot 10^{-20}$ см²/(мол·см) каждой, совпадение с точностью 0,01 и 0,02 см⁻¹ со второй гармоникой линии излучения $10P(27)$ ¹² CO_2 -лазера. Примеры измерения концентраций NO в полевых условиях приведены в работе [8].

5. Трассовые измерители на основе смесителей частоты CO_2 - и CO -лазеров

Введение в состав трассового измерителя второго CO_2 -лазера и использование имеющегося генератора второй гармоники для смешения частоты излучения обоих лазеров позволило дополнительно увеличить точность измерений и расширить номенклатуру контролируемых газов [7, 8]. При генерации всех вариантов суммарных частот в 40 раз увеличивается количество преобразованных по частоте линий излучения, что дает возможность выбора оптимальной линии из десятка возможных вариантов, например при контроле содержания CO по указанной выше линии поглощения. Полученной плотности комбинационных линий излучения достаточно для определения контура линии поглощения, а следовательно, температуры и давления газа. Дальнейшее увеличение числа зондируемых газовых компонентов атмосферы возможно при использовании генераторов высших гармоник и комбинационных частот излучений CO - и CO_2 -лазеров, фундаментального излучения первого CO_2 - и второй гармоники второго CO_2 -лазера. В последнем случае, например, минимально обнаруживаемые концентрации некоторых трудно контролируемых загрязнителей реальной атмосферы составляют единицы ppb при длине приземной измерительной трассы 1 км. В частности, 3 ppb для HCl при измерениях на суммарной частоте второй гармоники линии $10P(26)$ и линии $10P(20)$ или $2 \cdot 10P(26) + 10P(20)$ и использовании комбинационной линии излучения $2 \cdot 10P(26) + 10P(14)$ в качестве опорной, что дает коэффициент дифференциального поглощения $\Delta = 34$ см⁻¹·атм⁻¹. Для CH_4 это 2 ppb с использованием $2 \cdot 9P(10) + 10R(18)$ и $2 \cdot 9R(16) + 10P(32)$ с $\Delta = 43,7$ см⁻¹·атм⁻¹, 6 ppb для PH_3 с использованием $2 \cdot 9P(28) - 9R(34)$ и $2 \cdot 9P(34) - 9R(12)$ с $\Delta = 20,4$ см⁻¹·атм⁻¹. В этом случае налицо полное снятие ограничений на число контролируемых газов. Примеры измерения концентраций N_2O на суммарной частоте линий $9R(40)$ и $9R(18)$ двух CO_2 -лазеров, с точностью 15 ppb при длине трассы 2 км, приведены в [8]. Возможность измерения содержания CO_2 и NO_2 продемонстрирована в лабораторных условиях. Следующая модернизация трассового измерителя, которая уже содержала три перестраиваемых лазера, два CO_2 и CO , с набором ППЧ из $ZnGeP_2$, описана в [9].

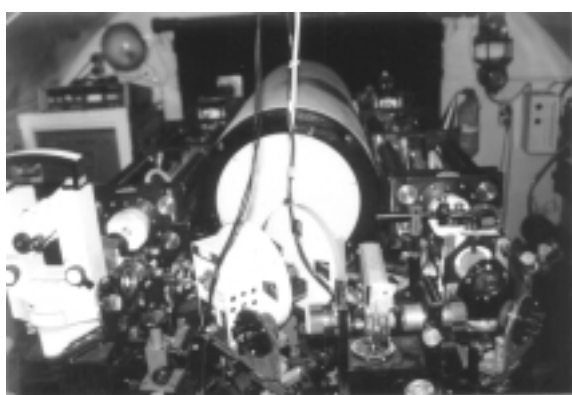
6. Лидарный газоанализирующий комплекс

Для проведения оперативного мониторинга атмосферы над большими площадями и многосторонних фундаментальных исследований, подготовки специалистов и обучения персонала действующих лидаров в 1993–1996 гг. был создан мобильный лидарный комплекс (рис. 2), позволяющий

реализовать все возможные варианты лидарных систем дифференциального поглощения [10–12].



a



b

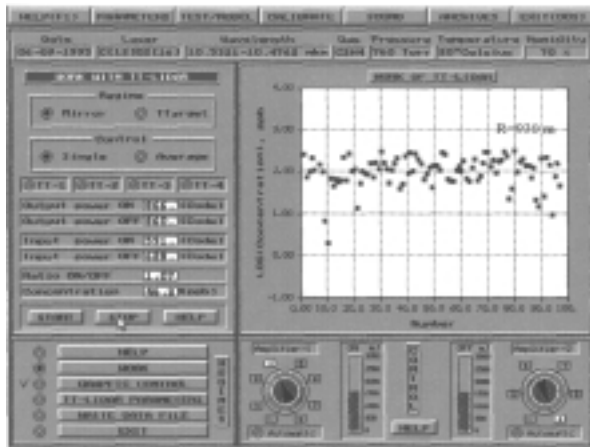
Рис. 2. Внешний вид лидарного комплекса дифференциального поглощения: приемопередающая часть двухрежимного лидара (на крыше) (а) и внешний вид трассового газоанализатора (вид спереди через открытый люк) внутри фургона (б)

Он состоит из независимо работающего трассового газоанализатора и переключаемого лидара, работающего по топографическим объектам или в режиме регистрации сигналов обратного рассеяния от аэрозолей атмосферы. В обоих случаях используется 500-мм приемная асферическая перенастраиваемая касегреновско-ньютонская система с эффективным фокусным расстоянием 1840 мм, 80% энергии регистрируемого сигнала сводится в пятно $\varnothing 60$ мкм. В данном случае использованы два оригинальных CO_2 -лазера собственного изготовления со смесителями частоты на ZnGeP_2 . Массивная (80 кг) жесткая рама на четырех 40-мм инваровых стержнях обеспечивает эффективную пассивную стабилизацию длины резонатора вместе с активной медленной магнитоотрицательной и быстрой пьезоэлектрической подстройками длины резонатора. При дополнительной селекции TEM_{00} -моды и подборе уровня накачки высокостабилизированным источником питания спектральная ширина линии излучения сужается от $2 \cdot 10^{-3}$ до $6 \cdot 10^{-6}$ см^{-1} , что соответствует ширине одной выделенной продольной моды, застabilизированной в центре линии люминесценции. Газовая кварцевая кювета и при-

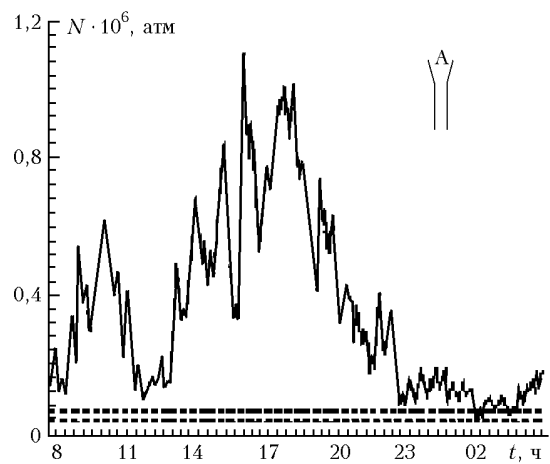
менение оптико-акустического детектора позволяют проводить исследование локального содержания газовых компонентов атмосферы и определение сечений поглощения для модельных условий всей толщи атмосферы. При регистрации сигналов обратного рассеяния аэрозолями выполненный по биаксиальной схеме лидар работает в режиме прямого детектирования. В его состав входят два перестраиваемых импульсно-периодических ТЕА CO_2 -лазера с энергией импульса излучения 1 ~ 4 Дж, спектральной шириной линии излучения $0,1 \text{ см}^{-1}$, частотой повторения импульсов 0,2–4 Гц, длительностью первого пика импульса излучения 40 ~ 120 нс и длительностью «хвоста» 0,1 ~ 3 мкс с отношением его энергии к полной энергии до 25%, регулируемой подбором активной смеси и режима питания. Лазеры излучали пару импульсов на разных длинах волн с временной задержкой около 1–3 мс.

С помощью модельных оценок с использованием результатов предварительных измерений перед началом работы выбирается геометрический фактор лидара, оптимальный для решения поставленной на данный момент задачи. Затем он устанавливается, благодаря предусмотренной возможности контролируемого изменения всех геометрических параметров приемопередающей системы лидара: угла поля зрения приемной и передающей оптических систем, углов их схождения, базового расстояния и эффективных фокусных расстояний, а также параметров зондирующих пучков излучения. Перед работой в ТТ-режиме предварительно исследовались коэффициенты отражения топографических объектов. Найдено, что их значения лежат в пределах от 0,1–0,2% (трава склонов холмов, кроны деревьев) до 5–7% (скальные породы, листы неполированного металла, стены зданий). Система контроля и обработки результатов собрана на базе персонального компьютера, имеет программируемые усилители, 12 бит 1 МГц АЦП. Она осуществляла проверку состояния отдельных узлов и лидара в целом до и после проведения циклов измерений, учитывала реальные метеорологические параметры атмосферы, рассчитывала ожидаемые параметры лидара для каждого конкретного цикла измерений и, при необходимости, сравнивала их с реализованными параметрами и/или с параметрами других известных лидаров, обрабатывала результаты измерений в масштабе реального времени и в постизмерительный период, сохраняла их. Обе системы лидарного комплекса имели оптические столы и оптико-механические узлы, позволяющие реализовать любой их известный вариант или локальный измеритель.

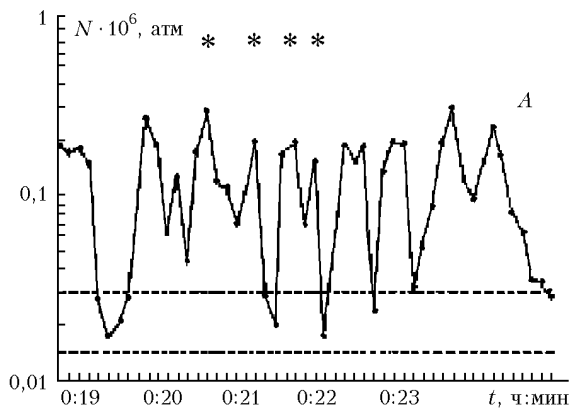
Полевые испытания лидарного комплекса проведены в KAIST (Тэджон, Южная Корея). Дальность действия при работе по топографическим целям достигает 10–15 км, а максимальная дальность, с которой удалось зарегистрировать сигналы обратного рассеяния, — 5 км с пространственным разрешением 150–200 м. Результаты измерений в масштабе реального времени отображались на экране дисплея. На рис. 3,а представлены, в частности, результаты измерений содержания C_2H_4 при работе в ТТ-режиме.



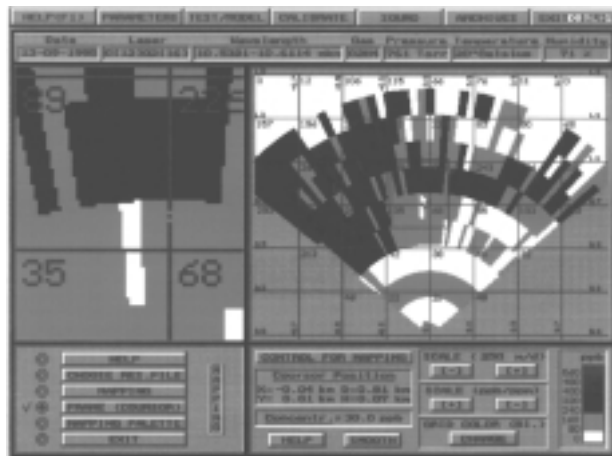
a



б



в



г

Рис. 3. Вариации концентрации этилена в атмосфере г. Тэджон, Корея: данные трассовых измерений с использованием топографических целей в качестве отражателей в масштабе реального времени (*a*), после окончательной обработки за сутки (*б*) и в ночное время (*в*). Штриховые линии – фоновые концентрации, звездочками отмечено время контрольных проездов автомобиля под измерительной трассой. Результаты картирования получены в режиме регистрации сигналов обратного рассеяния

Архивирование результатов измерений и их последующая обработка позволяли получить как суточный ход изменения концентрации C_2H_4 , так и быстрые изменения за короткие интервалы времени (рис. 3, *б, в*).

При работе в DAS-режиме и сканировании по углу места и высоте построены двухмерные карты распределения загрязнений с топографической привязкой к местности (рис. 3, *г*). Основными источниками ошибок при измерениях являются быстрые вариации регистрируемых сигналов, затрудняющие их сглаживание, некорректность знания коэффициента обратного аэрозольного рассеяния и электромагнитные наводки. При работе по целям, удаленным на расстояние 3 км, получено отношение сигнал-шум до 10 000 за одну пару выстрелов. При длине трасс 3 км точность определения концентраций составила 1–10 и 20–80 ppb при трассовых измерениях и работе по топографической цели, 20–100 ppb/км по обратному рассеянию.

7. Невостребованные и перспективные источники излучения для лидарных систем

В силу финансовых проблем остались не реализованными варианты лидаров на основе ряда оригинальных источников излучения, разработанных еще к началу 1990-х гг. К ним следует отнести CO_2 -лазер, работающий одновременно в фундаментальных и «горячих» 9- и 10-мкм полосах излучения, а также в 4,3-мкм полосе излучения и на отдельных линиях излучения в районе 2–3 мкм на добавленных в рабочую смесь инертных газах, с набором преобразователей частоты – генераторов гармоник и комбинационных частот всех линий излучения. Преобразованным по частоте спектром излучения перекрыт диапазон 2–12 мкм, не уступающей диапазону генерации широкополосных ПГС, с плотностью до 10^{-3} см^{-1} . Применение такого

источника излучения для газоанализа приземной атмосферы равносильно использованию плавно перестраиваемого по частоте источника излучения [13]. Невостребованным остался и генератор субмиллиметрового излучения, работающий с перестройкой по частоте в диапазоне 102,6–110,76 мкм, представляющий собой генератор разностной частоты различных пар линий излучения двухчастотного ТЕА CO₂-лазера [14], а также ап-конверторы излучения лазеров среднего ИК-диапазона в ближнюю ИК-область, способные увеличить отношение сигнал-шум лидарных фотоприемников на 1–2 порядка [15].

В последние годы исследованы физические свойства малоисследованных нелинейных кристаллов HgGa₂S₄ и LiInSe₂, новых LiInSe₂, а также новых смешанных кристаллов AgGaGeS₄ из семейства AgGa_{1-x}Ge_xS₄ при $x = 0,5$ и Hg_{0,65}Cd_{0,35}Ga₂S₄ из семейства Hg_(1-x)Cd_xGa₂S₄. Показана их применимость для создания более эффективных, по сравнению с известными кристаллами, и оригинальных источников излучения для лидарных систем [16, 17]. Так, при удвоении частоты CO₂-лазера кристаллы HgGa₂S₄ и Hg_{0,65}Cd_{0,35}Ga₂S₄ показали в три раза большую эффективность, чем кристаллы ZnGeP₂. Все перечисленные кристаллы пригодны для запуска эффективных ПГС среднего ИК-диапазона с накачкой твердотельными лазерами, в том числе впервые с накачкой Nd:YAG-лазером, поскольку их диапазон прозрачности начинается с длин волн 0,4–0,6 мкм и заканчивается в районе 12,5–16,5 мкм. Показано, что доведение технологии выращивания качественных легированных кристаллов GaSe:In позволит сделать для них тот же вывод. Использование преобразователей частоты Nd:YAG-лазеров на основе новых кристаллов в средней ИК-области спектра, в сочетании с существующими коммерческими преобразователями частоты этих лазеров в УФ-область на LBO, KTA, KTP и BBO, позволяет создать источники когерентного излучения диапазона 0,2–12,0 мкм. Такие источники излучения могут быть использованы при создании универсальных газоаэрозольных лидаров. Особенности спектра прозрачности и высокие нелинейные свойства позволяют вести разработку генераторов разностных частот микрочипных Nd:YAG и полупроводниковых лазеров для переносных микролидаров. Двухосные кристаллы LiInSe₂, LiInSe₂ и AgGa_{1-x}Ge_xS₄ демонстрируют большие возможности в прямом преобразовании частоты существующих фемтосекундных лазеров в средний ИК-диапазон и их использовании для создания фемтосекундных лидаров.

Заключение

На основании результатов, приведенных в данной статье, можно констатировать, что развиваемая концепция в разработке лидаров-газоанализаторов среднего ИК-диапазона и основные направления ее реализации по исследованию газового состава атмосферы сформулированы достаточно комплексно и заслуживают дальнейшего развития. Полученные

результаты имеют очевидную научную и практическую значимость не только в проблеме охраны окружающей среды, но и в других областях науки и техники, где требуется применение перестраиваемых по частоте, мощных и надежных источников излучения среднего ИК-диапазона. В дальнейших исследованиях планируется усилить направление разработки универсальных газоаэрозольных лидаров, работающих в диапазоне 0,2–14,0 мкм, а также фемтосекундных и носимых вариантов лидаров.

1. Самохвалов И.В., Соснин А.В., Хмельницкий Г.С. Зондирование газов естественного и промышленного происхождения с помощью CO₂-лазера // Тр. Всес. симп. «Радиофизические исследования атмосферы». Л.: Гидрометеонздат, 1977. С. 78–82.
2. Самохвалов И.В., Соснин А.В., Хмельницкий Г.С., Шубин С.Ф. Определение концентрации некоторых газов на горизонтальных трассах в атмосфере с помощью перестраиваемого CO₂-лазера // Ж. прикл. спектроскопии. 1980. Т. 32. № 3. С. 525–531.
3. Войцеховский А.В., Лиленко Ю.В., Петров А.С., Самохвалов И.В., Соснин А.В., Хмельницкий Г.С. Результаты исследования обратного рассеяния излучения CO₂-лазера лидарной системой // Дистанционное зондирование атмосферы. Новосибирск: Наука, 1978. С. 141–145.
4. Андреев Ю.М., Карасев М.Е., Костин В.В., Кулевский Л.А., Смирнов В.В., Соснин А.В. Лидар для зондирования загрязнений атмосферы на основе параметрического генератора света // Тезисы докл. V Всес. симп. по лазерному зондированию атмосферы. Томск: ИОА СО АН СССР, 1978. С. 7–11.
5. Зуев В.Е., Кабанов М.В., Андреев Ю.М., Воеводин В.Г., Гейко П.П., Грибенюков А.И., Зуев В.В. Эффективные параметрические преобразователи частоты ИК-лазеров и их применение // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1988. Т. 52. № 6. С. 1142–1149.
6. Андреев Ю.М., Воеводин В.Г., Грибенюков А.И., Давыдов В.Н., Журавлев В.И., Капитанов В.А., Стучебров Г.А., Хмельницкий Г.С. Трассовый газоанализатор на основе перестраиваемого CO₂-лазера с удвоением частоты // Ж. прикл. спектроскопии. 1987. Т. 47. № 1. С. 15–20.
7. Андреев Ю.М., Гейко П.П., Давыдов В.Н., Зуев В.В., Романовский О.А. Трассовый газоанализатор диапазона 5 мкм, работающий по топографическому отражателю // Оптические свойства земной атмосферы. Томск: ТФ СО АН СССР, 1988. С. 132–135.
8. Андреев Ю.М., Васин И.Л., Гейко П.П., Долгий С.И., Зуев В.В., Смирнов С.В., Шубин С.Ф. Зондирование газовых компонент и метеовеличин атмосферы методом дифференциального поглощения и рассеяния в среднем ИК-диапазоне спектра // Результаты комплексных экспериментов «Вертикаль 86» и «Вертикаль 87». Томск: ИОА СО АН СССР, 1989. С. 77–94.
9. Андреев Ю.М., Гейко П.П., Зуев В.В., Романовский О.А., Шубин С.Ф. Контроль газовых загрязнений воздушной среды с помощью CO₂ и СО-лазеров, снабженных преобразователями частоты // Тезисы докл. XIII Межд. конф. по когерентной и нелинейной оптике. Ч. 2. Минск, 1988. С. 221–222.
10. Andreev Yu.M., Kataev M.Yu., Razenkov I.V., Shevtov K.D., Sherstov I.V. Differential absorption Lidar Complex // Technical report. Tomsk–Seoul, 1996. 686 p.
11. Андреев Ю.М., Разенков И.А., Шефер Н.А. Программное обеспечение для инженерных расчетов ла-

- зерных локационных систем // Оптика атмосф. и океана. 1996. Т. 9. № 10. С. 1423–1427.
12. Андреев Ю.М., До С.В., Разенков И.А., Шерстов И.В., Шефер Н.А., Конг Х.Д., Пак Е.Д. Настройка и тестирование ИК-ДПР-лидара с использованием программных средств // Оптика атмосф. и океана. 1997. Т. 10. № 1. С. 119–124.
 13. Андреев Ю.М., Гейко П.П., Грибенюков А.И., Воеводин В.Г., Зуев В.В., Солодухин А.С., Трушин С.А., Чураков В.В. Преобразование нетрадиционных (4,3 и 10,4 мкм) полос излучения CO₂-лазера в ZnGeP₂ // Квант. электрон. 1987. Т. 4. № 10. С. 2137–2138.
 14. Andreev Yu.M., Apollonov V.V., Shakir Yu.A., Gribenyukov A.I. Submillimeter-wave generation with ZnGeP₂ crystals // J. Korean Phys. Soc. 1998. V. 33. N 3. P. 356–361.
 15. Андреев Ю.М., Гейко П.П., Воеводин В.Г. Ап-конверсия излучения CO₂-лазеров микросекундной длительности // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 13. № 4. С. 401–406.
 16. Андреев Ю.М., Гейко П.П. Нелинейно-оптические преобразователи частоты как элементная база для ИК-лидаров // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15. № 1. С. 62–70.
 17. Andreev Yu.M., Geiko P.P., Badikov V.V., Bhar G.C., Das S., Chaudhury A.K. Nonlinear optical properties of defect tetrahedral crystals HgGa₂S₄ and AgGaGeS₄ and mixed chalcopyrite crystal Cd_(0.4)Hg_(0.6)Ga₂S₄ // Nonlinear Optics. 2002. V. 29. N 1. P. 19–27.

Andreev Yu.M., Geiko P.P., Samokhvalov I.V. **Sensing of gaseous atmospheric pollution by DIAL method in the IR spectral region.**

The paper summarizes results on design of differential absorption lidar systems with home made laser sources. The design works have been carried out by IAO SB RAS, SPTI, IOM SB RAS and RPF TSU since 1974 until now. Field test and atmospheric gas composition measurement results are presented.