

МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ. ОБРАБОТКА ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

УДК 621.373.826

А.И. Карапузиков, И.В. Пташник, О.А. Романовский, О.В. Харченко, И.В. Шерстов

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВЕРТОЛЕТНОГО ЛИДАРА НА ОСНОВЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ПЕРЕСТРАИВАЕМОГО ТЕА СО<sub>2</sub>-ЛАЗЕРА ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ УТЕЧЕК МЕТАНА

Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск  
Институт лазерной физики СО РАН, Томск

Поступила в редакцию 28.12.98 г.

Принята к печати 4.02.99 г.

Показано, что для дистанционного зондирования выбросов метана наиболее перспективным является 3-мкм диапазон спектра. Приведены оценки необходимых параметров излучения перестраиваемого импульсно-периодического мини-ТЕА СО<sub>2</sub>-лазера и генераторов гармоник для использования в вертолетном лидаре дифференциального поглощения. Проведено численное моделирование возможностей дистанционного определения выбросов метана различной интенсивности из трубопроводов на расстоянии до 1 км с использованием третьей гармоники ТЕА СО<sub>2</sub>-лазера в лидаре бортового базирования. Применение третьей гармоники ТЕА СО<sub>2</sub>-лазера дает возможность идентификации выбросов метана из трубопровода со средней ошибкой измерений 10–15% для уровней концентраций метана от фонового до близкого к взрывоопасному.

Введение

В связи с интенсивным развитием нефтегазового комплекса большое значение приобретает задача контроля газовых выбросов из трубопроводов, представляющих собой источник повышенной экологической опасности. Поэтому возникает проблема разработки соответствующих методов исследования локального газового состава атмосферы, обеспечивающих получение данных с высокой оперативностью и в значительных пространственных масштабах.

Этим требованиям наиболее полно удовлетворяют лазерные методы зондирования газовых компонент атмосферы.

При этом наибольшим сечением взаимодействия обладает резонансное поглощение, что и обуславливает высокую чувствительность лазерного метода дифференциального поглощения (МДП), использующего это явление.

Состояние проблемы

Для зондирования метана МДП возможно использование полос поглощения в ближней и средней ИК-области спектра. Спектроскопические параметры этих полос, заимствованные из [1], приведены в табл. 1.

Таблица 1

Спектроскопические параметры полос поглощения метана С<sup>12</sup>Н<sub>4</sub>

№ п/п	Количество линий	$\nu_{\min}, \text{см}^{-1}$	$\nu_{\max}, \text{см}^{-1}$	$I_{\min}, \text{см/молек.}$	$I_{\max}, \text{см/молек.}$	$I_{\text{sum}}, \text{см/молек.}$
1	4017	944,397	1627,974	$2,30 \cdot 10^{-27}$	$9,68 \cdot 10^{-20}$	$5,14 \cdot 10^{-19}$
2	2397	1109,032	1605,075	$4,04 \cdot 10^{-26}$	$3,82 \cdot 10^{-22}$	$3,65 \cdot 10^{-20}$
3	2641	1163,297	1865,705	$5,94 \cdot 10^{-28}$	$1,03 \cdot 10^{-21}$	$5,44 \cdot 10^{-20}$
4	1266	2255,492	2847,219	$1,32 \cdot 10^{-24}$	$8,39 \cdot 10^{-22}$	$5,50 \cdot 10^{-20}$
5	839	2511,381	3175,006	$1,00 \cdot 10^{-24}$	$1,10 \cdot 10^{-21}$	$1,45 \cdot 10^{-20}$
6	2300	2573,104	3167,121	$1,22 \cdot 10^{-24}$	$5,18 \cdot 10^{-21}$	$3,78 \cdot 10^{-19}$
7	1903	2809,527	3209,941	$1,48 \cdot 10^{-24}$	$2,13 \cdot 10^{-19}$	$1,08 \cdot 10^{-17}$
8	712	2880,787	3153,543	$2,20 \cdot 10^{-24}$	$6,17 \cdot 10^{-22}$	$4,45 \cdot 10^{-20}$
9	754	2919,131	3253,323	$1,00 \cdot 10^{-24}$	$7,16 \cdot 10^{-22}$	$3,40 \cdot 10^{-20}$
10	172	4136,164	4278,242	$1,90 \cdot 10^{-22}$	$5,24 \cdot 10^{-21}$	$2,40 \cdot 10^{-19}$
11	958	4147,844	4489,169	$1,56 \cdot 10^{-23}$	$5,53 \cdot 10^{-21}$	$4,08 \cdot 10^{-19}$
12	388	4409,945	4666,559	$2,05 \cdot 10^{-23}$	$1,21 \cdot 10^{-21}$	$6,24 \cdot 10^{-20}$
13	144	5991,066	6106,295	$4,06 \cdot 10^{-23}$	$1,32 \cdot 10^{-21}$	$5,97 \cdot 10^{-20}$

Как видно из табл. 1 и рис. 1, наиболее мощной является полоса поглощения с центром около 3 мкм ( $\sim 3000 \text{ см}^{-1}$ , полоса N 7 с суммарной интенсивностью  $1,08 \cdot 10^{-17} \text{ см} \cdot \text{молек.}^{-1}$ ), в пределах которой имеются богатые возможности выбора оптимальных длин волн для зондирования

фоновых и надфоновых концентраций метана. К тому же в этот же диапазон попадают еще несколько полос поглощения с меньшей интенсивностью (полосы N 4–6 и N 8, 9), что позволяет найти информативные длины волн для зондирования выбросов метана с большой концентрацией, превышающей фоновую на несколько порядков.

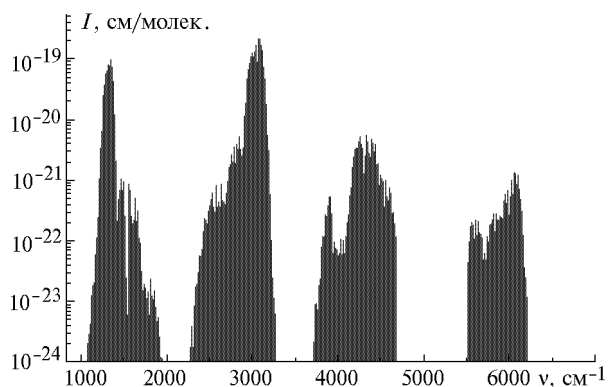


Рис. 1. Положение и интенсивность полос поглощения метана

Имеются также полосы поглощения метана с центрами около 7,5 мкм ( $\sim 1300 \text{ см}^{-1}$ , полосы N 1–3), 2,2 мкм ( $\sim 4500 \text{ см}^{-1}$ , полосы N 10–12) и 1,66 мкм ( $\sim 6000 \text{ см}^{-1}$ , полоса N 13), но они имеют интенсивность на 2–3 порядка меньше, что позволяет использовать их для лидарного зондирования метана лишь при больших концентрациях (больше 50–100 ppm).

В настоящее время реализованы измерения метана по МДП по трассовой схеме с использованием зеркального отражателя на длинах волн He–Ne-лазера 3,3922 мкм ( $2947,9394 \text{ см}^{-1}$ ) и 3,3912 мкм ( $2948,8087 \text{ см}^{-1}$ ), использованных в качестве основной и референтной частот соответственно [2]. Однако применение этого лазера, имеющего невысокую выходную мощность (десятки милливатт), для лидарных измерений с топочелью в качестве отражателя возможно лишь для трасс длиной не более 100–150 м, что может быть небезопасно при зондировании экстремальных выбросов метана.

В работе [3] сообщается об измерениях по МДП концентрации метана с использованием излучения Nd:YAG-лазера, преобразованного с помощью оптического параметрического генератора в 3-мкм область спектра. При этом в качестве основной частоты использовалась линия излучения 3,313 мкм ( $3018,41 \text{ см}^{-1}$ ), а референтной – 3,309 мкм ( $3022,06 \text{ см}^{-1}$ ). Проведенный нами расчет спектров поглощения показал, что предложенные в [3] длины волн могут быть использованы только с учетом корректировки сильного мешающего поглощения водяного пара и лишь при небольших концентрациях метана в выбросе (не более 10–20 ppm).

С другой стороны, в работе [4] приводится пример удачной реализации схемы бортового (вертолетного) трассового анализатора аммиака с использованием основной гармоники непрерывного перестраиваемого  $\text{CO}_2$ -лазера, позволившего провести картирование и идентификацию источников выброса аммиака вдоль газопровода и в окрестности химического комбината.

В [5] было предложено применить для диагностики утечек метана излучение третьей гармоники  $\text{CO}_2$ -лазера, однако никаких конкретных оценок возможностей такого излучателя для лидарного зондирования по МДП не приведено.

Целью данной работы является количественная оценка на основе численного моделирования возможностей дистанционного определения выбросов метана различной интенсивности из трубопроводов на расстоянии до 1 км с использованием третьей гармоники ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазера в работающем по топочели лидаре бортового (вертолетного) базирования.

## Выбор излучателя для вертолетного трассового газоанализатора

Проведем некоторые оценки по определению необходимых энергетических и спектральных параметров излучателя для вертолетного трассового газоанализатора для обнаружения утечек метана из трубопроводов. Метан является взрывоопасным газом, поэтому его зондирование с борта вертолета должно производиться с безопасного расстояния до 1 км. На рис. 2 представлена схема зондирования, согласно которой вертолет летит со скоростью 40 м/с (около 150 км/ч) на высоте  $h = 700 \text{ м}$  вдоль трубопровода на расстоянии от него  $R = 700 \text{ м}$ , а оптический луч распространяется от вертолета к Земле под углом  $\alpha = 135^\circ$  от зенита. При этом длина трассы зондирования  $L$  составляет 1 км.

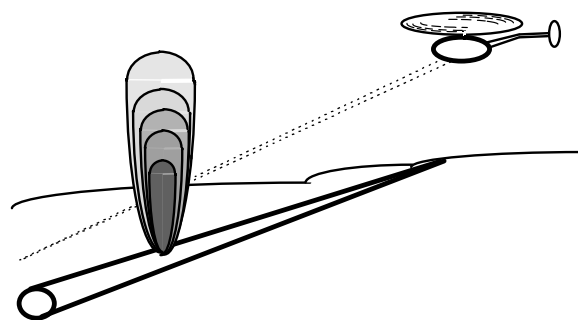


Рис. 2. Схема лидарного зондирования метана с борта вертолета

При зондировании атмосферы происходят накопление и усреднение лидарных эхосигналов по нескольким парам лазерных импульсов, повышающие отношение сигнал/шум. Положим, что накопление сигнала можно производить лишь за некоторый промежуток времени  $\tau$ , в течение которого вертолет смещается на расстояние  $\Delta R$ , сравнимое с размером пятна излучения на поверхности Земли. В этом случае можно утверждать, что в поле зрения приемника лидара находится практически один участок зондируемой трассы. Выберем расходимость зондирующего лазерного пучка  $2\theta_i = 3 \text{ мрад}$  и полный угол поля зрения приемника лидара  $2\theta_r = 4 \text{ мрад}$ . Диаметр пятна лазерного излучения на поверхности Земли на расстоянии  $L = 1 \text{ км}$  будет при этом равен 3 м. Вертолет при скорости движения  $v = 40 \text{ м/с}$  преодолеет расстояние  $\Delta R = 3 \text{ м}$  за время  $\Delta t = 0,075 \text{ с}$ , поэтому время накопления сигнала можно выбрать  $\tau = 0,1 \text{ с}$ . Положим, что за время  $\tau$  необходимо произвести накопление сигнала по  $n = 10$  парам импульсов, т.е. всего по 20 импульсам. Таким образом, минимальная частота следования импульсов  $f$  и переключения длин волн излучения лазера, применяемого в вертолетном трассовом газоанализаторе, равна 200 Гц. Отметим также, что при указанной частоте повторения импульсов временная задержка между двумя соседними импульсами составляет  $\Delta t = 5 \text{ мс}$ , что удовлетворяет условию «тубуrolентно-замороженной» атмосферы.

Перестраиваемое лазерное излучение в спектральном диапазоне 3,1–3,6 мкм можно получить путем эффективно-го преобразования частоты излучения импульсно-периодического ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазера в третью гармонику. В настоящее время достигнуты заметные результаты по генерации гармоник и комбинационных частот излучения  $\text{CO}_2$ -лазеров. Так, например, при использовании тандема нелинейных кристаллов  $\text{AgGaSe}_2\text{--ZnGeP}_2$  получена чет-

вертая гармоника импульсного излучения CO<sub>2</sub>-лазера с длиной волны 2,38 мкм при общей эффективности преобразования около 10% [6]. В работе [7] сообщается о генерации третьей гармоники излучения импульсно-периодического ТЕА CO<sub>2</sub>-лазера (линия 10P(20)) в кристаллах AgGaSe<sub>2</sub> с общей эффективностью 10%, причем 40% мощности второй гармоники было преобразовано в третью гармонику.

Рассмотрим возможность использования в качестве излучателя вертолетного трассового газоанализатора метана импульсно-периодический мини-ТЕА CO<sub>2</sub>-лазер с энергией импульсов излучения  $E_0 = 20$  мДж при длительности импульсов на полувысоте  $\tau_{FWHM} = 50$  нс и частоте повторения  $f = 200$  Гц, а также генератор третьей гармоники на основе кристаллов AgGaSe<sub>2</sub> или ZnGeP<sub>2</sub> с эффективностью преобразования  $\eta = 5\%$ . В этом случае импульс третьей гармоники излучения мини-ТЕА CO<sub>2</sub>-лазера с длиной волны около 3 мкм будет иметь энергию  $E_3 = 1$  мДж. При длительности на полувысоте 50 нс это соответствует импульсной мощности излучения  $P_t = 20$  кВт.

Оценим мощность лидарного эхосигнала  $P_s$ , регистрируемого приемником лидара. Упрощенную формулу для  $P_s$  можно записать в виде

$$P_s = P_t K_t K_r r_a T_a (S / 2\pi L^2), \quad (1)$$

где  $P_t$  – импульсная мощность излучения передатчика;  $K_t$  – пропускание передающей оптики;  $K_r$  – пропускание приемной оптики (в том числе спектрального фильтра);  $r_a$  – коэффициент диффузного отражения от поверхности Земли (альбедо);  $T_a$  – пропускание атмосферы;  $S = \pi a^2$  – площадь объектива приемного телескопа,  $2\pi L^2$  – площадь верхней полусферы пространства на расстоянии  $L$ . Для оценки  $P_s$  выберем следующие характерные величины:  $K_t = 0,7$ ,  $K_r = 0,4$ ,  $r_a = 0,05$ ,  $T_a = e^{-1} = 0,37$ ,  $S = 0,03$  м<sup>2</sup> при апертуре приемного телескопа  $2a = 0,2$  м,  $L = 1000$  м. При перечисленных условиях и использовании лидарного передатчика с импульсной мощностью излучения  $P_t = 20$  кВт величина регистрируемого лидарного эхосигнала составит  $P_s = 520$  нВт.

Рассмотрим величину шумовой компоненты  $N_b$ , обусловленную фоновым излучением. Она описывается формулой

$$N_b = B S (\pi\theta_r^2) \Delta\lambda K_r, \quad (2)$$

где  $B$  – величина фонового излучения;  $\pi\theta_r^2$  – телесный угол поля зрения приемника;  $\Delta\lambda$  – ширина полосы пропускания спектрального фильтра. Подставляя в (2) величины  $\theta_r = 2$  мрад,  $B = 0,003$  Вт/(м<sup>2</sup>·ср·нм) и  $\Delta\lambda = 30$  нм, получим мощность фонового излучения  $N_b = 14$  нВт.

При выборе детектора отдадим предпочтение малогабаритным InAs-детекторам, не требующим охлаждения жидким азотом. Так, например, InAs-детектор марки J12TE2-8B6-R01M (производство компании «EG&G Judson», Канада) имеет диаметр чувствительной площадки 1 мм и две ступени охлаждения (рабочая температура кристалла  $T = -40$  °C), обладает величиной NEP = 2,9 пВт/Гц<sup>1/2</sup> и постоянной времени  $\tau < 50$  нс. При ширине полосы пропускания электронного тракта  $\Delta f = 10$  МГц мощность шума, обусловленная NEP этого детектора, составит  $N_d = 9$  нВт.

В результате полная мощность шума при единичном измерении эхосигнала составит  $N = N_d + N_b = 23$  нВт, а отношение сигнал/шум = 520 нВт/23 нВт  $\approx 23$ . При накоплении сигнала по 10 парам импульсов отношение сиг-

нал/шум увеличится в  $\sqrt{10}$  раз и составит величину  $\approx 71$ , т.е. относительная доля шумов будет  $\sim 1,4\%$ .

Таким образом, суммируя все вышесказанное, делаем вывод, что для применения в вертолетном лидаре для дистанционного обнаружения утечек метана из трубопроводов с расстояния 1 км необходим компактный перестраиваемый импульсно-периодический ТЕА CO<sub>2</sub>-лазер с частотой следования импульсов и переключения длин волн не менее 200 Гц и энергией импульсов излучения не менее 20 мДж при длительности импульсов на полувысоте 50 нс, а также генератор третьей гармоники, имеющий эффективность преобразования не менее 5%. Перечисленным выше требованиям удовлетворяет мини-ТЕА CO<sub>2</sub>-лазер, описанный в [8].

В ИЛФ СО РАН (г. Новосибирск) разрабатывается быстроперестраиваемый импульсно-периодический мини-ТЕА CO<sub>2</sub>-лазер для работы совместно с генератором третьей гармоники в составе лидара дифференциального поглощения воздушного базирования для дистанционного обнаружения утечек метана из трубопроводов. Лазер излучает короткие оптические импульсы в спектральном диапазоне 9,2–10,8 мкм с частотой следования импульсов и переключения длин волн до 400 Гц. Энергия лазерных импульсов на сильных линиях достигает 50 мДж, пиковая мощность излучения около 500 кВт.

Разработка мини-ТЕА CO<sub>2</sub>-лазера ведется на основе экспериментальных результатов, полученных в ИЛФ СО РАН при исследовании и оптимизации параметров излучения мощного ТЕА CO<sub>2</sub>-лазера с энергией импульсов излучения 1–9 Дж. Этот лазер был изготовлен для использования в наземном мобильном лидаре дифференциального поглощения для мониторинга атмосферы в радиусе 10–15 км [10].

Оригинальной частью разработки мини-ТЕА CO<sub>2</sub>-лазера является оптимизированный газодинамический контур быстрой поперечной прокачки газовой смеси через разрядный промежуток, позволяющий мини-ТЕА CO<sub>2</sub>-лазеру работать с высокой частотой повторения импульсов излучения. Быстрая прокачка газовой смеси обеспечивается эффективным диаметральной вентилятором. В лазере используется газовая смесь CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>:He:H<sub>2</sub> в различных пропорциях при общем давлении смеси вблизи атмосферного и выше.

Селективный резонатор мини-ТЕА CO<sub>2</sub>-лазера подобно описанному в [9] имеет Г-образную структуру, куда входят неподвижная дифракционная решетка, выходное полупрозрачное зеркало и вращающееся многогранное зеркало, которое отклоняет оптический пучок на дифракционную решетку под разными углами падения и переключает длины волны излучения лазера в диапазоне 9,2–10,8 мкм со скоростью переключения до 400 Гц. При больших скоростях вращения переключающего зеркала происходит обрезание «хвоста» импульса излучения лазера из-за механической разъюстировки резонатора, что приводит к уменьшению длительности лазерного импульса.

Конструктивно бортовой лидар будет выполнен в виде двух блоков. В оптическом блоке размерами около 500×600×700 мм будут смонтированы излучатель мини-ТЕА CO<sub>2</sub>-лазера, генератор третьей гармоники и приемопередатчик лидара. Приемник лидара содержит телескоп Ньютона с апертурой 200 мм, детектор InAs с микрохолодильником и сменные спектральные фильтры. Электронный блок лидара содержит импульсный источник питания лазера, контрольную электронику и охладитель. Электрическое питание производится от источника +27В, энергопотребление около 1 кВт.

Излучение мини-ТЕА CO<sub>2</sub>-лазера преобразуется в третью гармонику с помощью нелинейных оптических кристаллов AgGaSe<sub>2</sub> или ZnGeP<sub>2</sub> с эффективностью 5–10%. В итоге в атмосферу посылается лазерный пучок с расходимостью  $2\theta_l = 3$  мрад, имеющий следующие спектральные и энергетические параметры:

диапазон длин волн излучения, нм	3040–3645
полуширина линии излучения, нм	0,1–0,2
частота повторения импульсов, Гц	400
длительность импульсов излучения на полувысоте, нс	50
энергия импульсов излучения (третья гармоника), мДж	1–2
пиковая мощность излучения (третья гармоника), кВт	20–40
частотная нестабильность излучения, нм	0,02

### Результаты численного моделирования

**Пакет программ SAGDAM.** Диалоговый пакет программ SAGDAM (Sounding of Atmospheric Gases by Differential Absorption Method) [11] предназначен для моделирования лазерного зондирования атмосферных газов методом дифференциального поглощения для вертикальных и наклонных трасс при наземном и бортовом базировании лидара. Основным результатом работы пакета являются оптимальные пары длин волн зондирования и рассчитанные для них профили ошибок.

Первоначально пакет SAGDAM был разработан для моделирования зондирования квазимонохроматическим источником излучения, т.е. таким источником, ширина линии излучения которого много меньше ширины линий поглощения зондируемого газа. Немонохроматичность лазера оценивалась при этом лишь в качестве одной из систематических погрешностей зондирования. Однако поскольку спецификой данной задачи является мощный ТЕА CO<sub>2</sub>-лазер с давлением рабочей смеси до 2 атм, была проведена модификация расчетной схемы для полного учета ширины линии лазерного излучения как при расчете спектров поглощения, так и при определении эффективных (в данном случае) коэффициентов поглощения газов [12].

**Исходные данные.** В качестве исходных данных для численного моделирования в пакет SAGDAM закладывались следующие параметры.

1) Геометрия трассы в виде схемы вертолетного лидарного зондирования метана представлена рис. 2. При этом высота лидара составила 700 м, угол зондирования (от зенита) 135°. При данной геометрии длина трассы (от

лидара до тополишени) составила 1 км. Среднее альbedo тополишени полагалось равным 10% [13].

2) Параметры третьей гармоники излучения быстроперестраиваемого мини-ТЕА CO<sub>2</sub>-лазера приведены выше.

3) Приемник:

приемная апертура телескопа, м <sup>2</sup>	0,03;
передающая апертура, м <sup>2</sup>	0,01;
угол поля зрения приемного телескопа, мрад	3;
ширина оптического фильтра, нм	20;
электрическая полоса приемника, МГц	50;
время накопления сигналов, с	0,1;
пропускание приемной и передающей оптики,	0,5;
погрешность измерения единичного лидарного эхосигнала, %	10;
NEP фотодетектора (на основе InSb <sub>LN2</sub> [14]), Вт/Гц <sup>1/2</sup>	$1 \cdot 10^{-12}$

4) Метеомодель: стандартная модель для лета средних широт (модель ИОА) [15] с фоновым содержанием метана и паров воды (как основного мешающего газа) в приземном слое 1,5 ppm и  $1,5 \times 10^4$  ppm соответственно. В процессе моделирования содержание метана в моделируемом облаке выброса диаметром 100 м около газопровода варьировалось от фонового (1,5 ppm) до близкого к взрывоопасному (15000 ppm).

5) Аэрозольная модель: оптико-локационная модель континентального аэрозоля [16].

6) Фоновое излучение: для верхней оценки сигналной погрешности, обусловленной неучетом фона, дифференциальное фоновое излучение полагалось равным 0,003 Вт/(ср·м<sup>2</sup>·нм), что соответствует 10% (альbedo) отраженной от поверхности околосредней солнечной радиации.

#### Оптимальные пары длин волн зондирования.

В результате численного моделирования на основе пакета SAGDAM для зондирования метана были отобраны четыре пары длин волн, информация о которых приведена в табл. 2. Из табл. 2 видно, что к рассмотрению предлагаются четыре оптимальные пары длин волн, две из которых находятся в 10R-ветви генерации CO<sub>2</sub>-лазера, а две – в 9P-ветви. При этом они являются одними из самых мощных линий генерации (номера линий от 12 до 20). В табл. 2 приведены также значения эффективного дифференциального коэффициента поглощения  $\Delta K$  для выбранных пар длин волн. Их значения отличаются более чем на порядок, что связано с необходимостью детектирования большого динамического диапазона возможных значений концентрации метана при выбросе из трубопровода. При моделировании концентрация метана в 100-м зоне выброса варьировалась от фоновой 1,5 ppm до близкой к взрывоопасной ~15000 ppm (см. табл. 2–4).

Таблица 2

№ п/п	$N_{CH_4}$ , ppm	$\nu_{on}$ , см <sup>-1</sup>	$\nu_{of}$ , см <sup>-1</sup>	$N_{on}$	$N_{of}$	$\Delta K$ , см <sup>-1</sup> ·атм <sup>-1</sup>
1	1,5–250	2927,7913	2923,8657	10R(20)	10R(18)	1,74–0,94
2	500–5000	2919,8655	2911,6416	10R(16)	10R(12)	0,07–0,05
3	1,5–250	3140,5627	3145,9824	9P(20)	9P(18)	1,8–1,14
4	500–15000	3156,5867	3161,7705	9P(14)	9P(12)	0,03–0,026

Таблица 3

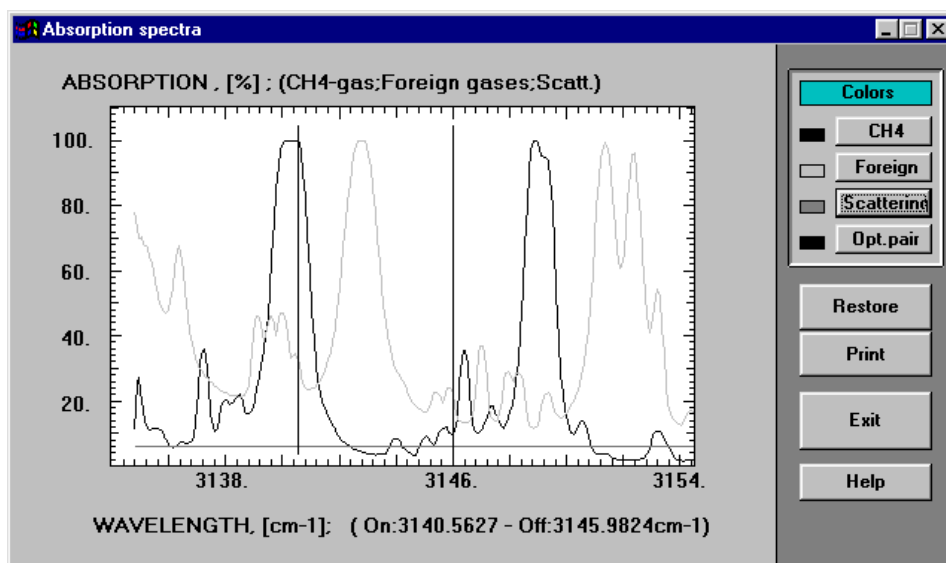
$\rho_{CH_4}$ , ppm	Оптимальная пара, см <sup>-1</sup>	$\Delta K$ , см <sup>-1</sup> ·атм <sup>-1</sup>	$T_{\Delta\nu}$	$\epsilon_{\Sigma}$ , %	$\epsilon_c$ , %	$\epsilon_m$ , %	$\epsilon_{\delta K}$ , %
1,5	3*9P(20)–3*9P(18)	1,8	0,60	40	6	39	10
250	3140,5627–3145,9824	1,14	0,004	14	10	4	9
500		0,030	0,75	19	11	13	8
1500	3*9P(14)–3*9P(12)	0,029	0,40	8	3,7	4	6
5000	3156,5867–3161,7705	0,028	0,06	6	1,2	1,4	6
15000		0,026	0,0004	7	2,5	0,5	6

Результаты численного моделирования зондирования выбросов метана в области третьей гармоники R-ветви CO<sub>2</sub>-лазера

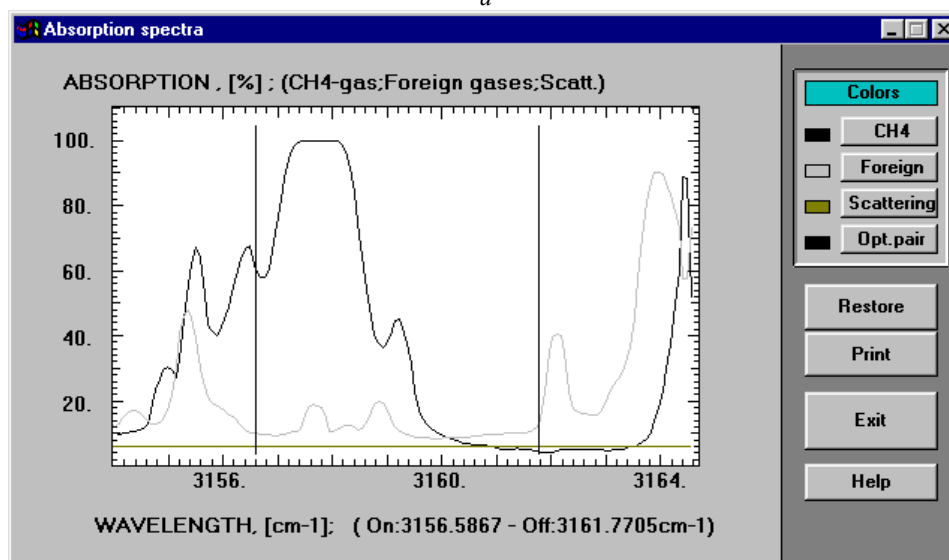
$\rho_{\text{CH}_4}$ , ppm	Оптимальная пара, см <sup>-1</sup>	$\Delta K$ , см <sup>-1</sup> ·атм <sup>-1</sup>	$T_{\Delta v}$	$\varepsilon_{\Sigma}$ , %	$\varepsilon_{\text{с}}$ , %	$\varepsilon_{\text{м}}$ , %	$\varepsilon_{\delta k}$ , %
1,5	3*10R(20)–3*10R(18)	1,74	0,58	11	7	4	7,5
250	2927,7913–2923,8657	0,94	0,008	30	27	0,4	11,5
500		0,071	0,43	16	4,5	12,0	8
1500	3*10R(16)–3*10R(12)	0,061	0,10	9,6	1,8	5	8
5000	2919,8655–2911,6416	0,046	0,002	12	5,4	2,0	10

Из табл. 2 видно также, что для использования любой из двух пар длин волн (в 10R- или в 9P-ветви) достаточно ширины оптического фильтра 20–30 см<sup>-1</sup> (20–30 нм). На рис. 3–4 представлены спектры поглощения метана и мешающих газовых компонент, а также по-

ложение третьих гармоник выбранных оптимальных пар. Как видно из рисунков, поглощение за счет сторонних газов на выбранных длинах волн мало по сравнению с эффективным дифференциальным коэффициентом поглощения метана.

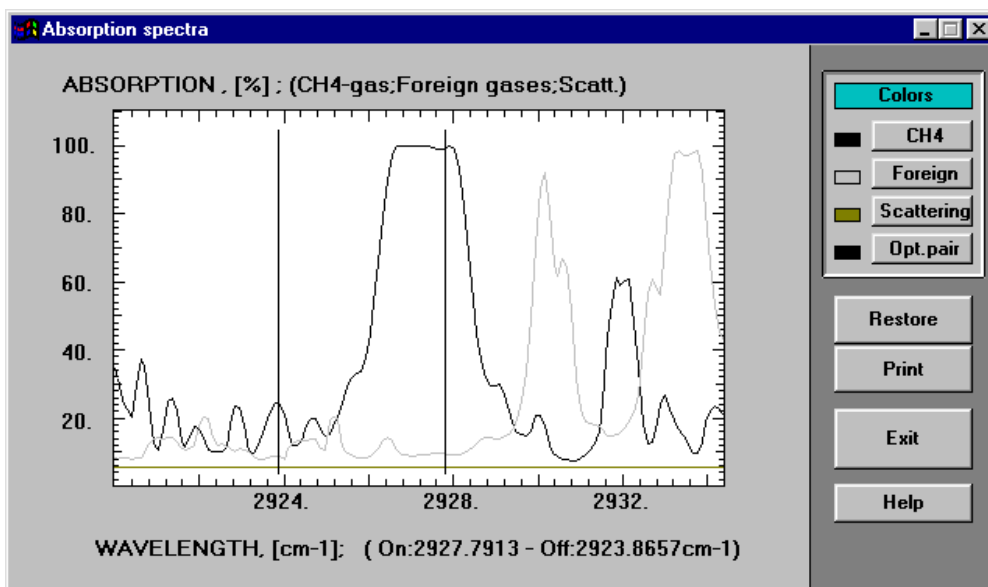


а

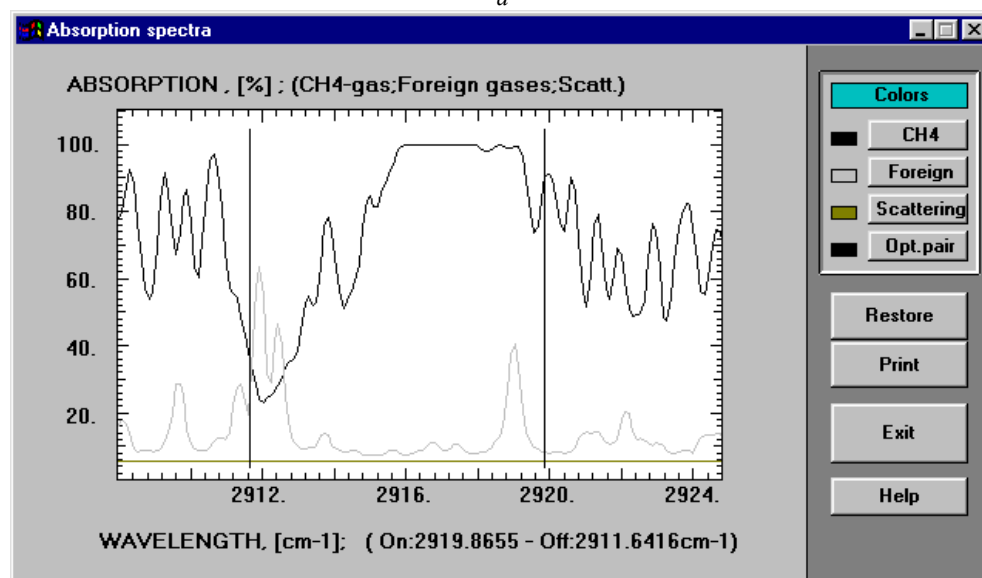


б

Рис. 3. Спектр поглощения метана (черная кривая), паров воды (серая кривая) и положение центров линий излучения третьей гармоники CO<sub>2</sub>-лазера 9P(20) и 9P(18) для концентрации метана в выбросе 250 ppm (а) и 9P(14) и 9P(12) для концентрации метана 1500 ppm (б)



a



б

Рис. 4. Спектр поглощения метана (черная кривая), паров воды (серая кривая) и положение центров линий излучения третьей гармоники CO<sub>2</sub>-лазера 10R(20) и 10R(18) для концентрации метана в выбросе 250 ppm (a) и 10R(16) и 10R(12) для концентрации метана 1500 ppm (б)

**Анализ ошибок зондирования.** Проведенный на основе пакета SAGDAM анализ ожидаемых ошибок зондирования выбросов метана на оптимальных парах длин волн приведен в табл. 3 и 4. В первом столбце таблиц указана концентрация метана  $\rho_{\text{CH}_4}$  в 100-м облаке выброса, во втором – оптимальная пара длин волн зондирования, в третьем – значение  $\Delta K$  для данного значения концентрации в зоне выброса, в четвертой – пропускание на выбранной паре длин волн  $T_{\Delta\nu}$ , в пятой – суммарная ошибка определения содержания метана  $\varepsilon_{\Sigma}$  за счет всех факторов. В столбцах 6–8 приведены соответственно: сигнальная ошибка, ошибка за счет мешающих газов и за счет погрешности расчета коэффициента поглощения  $\varepsilon_{\delta K}$ .

Как видно из таблиц, выбранные оптимальные пары длин волн, использующие линии поглощения различной

интенсивности, позволяют идентифицировать выбросы метана во всем диапазоне от 1,5 до 15000 ppm. При этом суммарный уровень ошибок не превышает 20% при концентрации метана в зоне выброса более 15–20 ppm. При зондировании фоновой концентрации ошибки для пары 3\*9P(20) – 3\*9P(18) могут составлять десятки процентов. В связи с этим необходимо использовать либо пару 3\*10R(20) – 3\*10R(18), либо более мощные линии поглощения CH<sub>4</sub>, например линию с центром 3018,16 см<sup>-1</sup>, совпадающую с третьей гармоникой линии излучения 9P(14) C<sup>13</sup>O<sub>2</sub><sup>16</sup> лазера [5].

### Выводы

1. Перспективным для дистанционного зондирования выбросов метана в атмосфере является 3-мкм диапазон спек-

тра с богатым выбором линий поглощения  $\text{CH}_4$  различной интенсивности.

2. В качестве источника лазерного излучения целесообразно использовать третью гармонику излучения перестраиваемого мини-ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазера, полученную путем эффективного преобразования частоты в нелинейных кристаллах  $\text{AgGaSe}_2$  или  $\text{ZnGeP}_2$ , позволяющую получать лазерные импульсы в спектральном диапазоне 3040–3645 нм с энергией 2–5 мДж при частоте повторения до 400 Гц.

3. Использование третьей гармоники излучения ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазера дает возможность идентификации выбросов метана из трубопроводов при вертолетном базировании лидара дифференциального поглощения с ошибками измерения концентраций 10–15% для уровней содержания метана в атмосфере от фонового до близкого к взрывоопасному. При этом достаточно использовать всего две пары длин волн: 10R(20)–10R(18) и 10R(16)–10R(12) либо 9P(20)–9P(18) и 9P(14)–9P(12).

Авторы выражают благодарность Г.Г. Матвиенко и Ю.Н. Пономареву за поддержку работы, обсуждение постановки задачи и полезные консультации.

1. Rothman L.S., Gamache R.R., Tipping R.N. et al. // JQSRT. 1992. V. 48. P. 469–507.
2. Астахов В.И., Бурмистров А.С., Галактионов В.В. и др. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. N 10. С. 65–69.
3. Anderson S.G. // Laser Focus World. 1995. N 12. P. 15–16.
4. Березовский В.В., Гандурин А.Л., Игумнов Е.А. и др. // Квантовая электроника. 1987. Т.14. № 9. С. 1917–1920.

5. Гейко П.П., Романовский О.А., Харченко О.В., Шубин С.Ф. Возможности применения преобразованного по частоте излучения  $\text{CO}$ - и  $\text{CO}_2$ -лазеров для газоанализа атмосферы по методу дифференциального поглощения. Деп. в ВИНИТИ. М., 36 с. 1990. 21.12.90, №6378-B90.
6. Chou H.P., Slater R.S., Wang Y. High-energy, fourth-harmonic generation using  $\text{CO}_2$ -lasers // Appl. Phys. 1998. B 66. P. 555–559.
7. Harasaki A., Sakuma J., Itoh T., etc. Mid-infrared atmospheric transmittance measurements by using the second and third harmonics of tunable TEA- $\text{CO}_2$ -laser // SPIE. 1997. V. 3125. P. 410–418.
8. Cohn D., Fox J., Swim C. Wavelength agile  $\text{CO}_2$ -laser for chemical sensing // SPIE. 1994. V. 2118. P. 72–82.
9. Fox J., Ahl J.L. High speed tuning mechanism for  $\text{CO}_2$ -lidar systems // Appl. Opt. 1986. V. 25. N 21. P. 3830–3834.
10. Андреев Ю.М., Карапузиков А.И., Разенков И.А. и др. // Межд. симпозиум «Контроль и реабилитация окружающей среды»: Тезисы докл. Томск, 1998. С. 15–18.
11. Firsov K.M., Kataev M.Yu., Mitsel' A.A., Ptashnic I.V., Zuev V.V. // JQSTR. 1999. V. 61. N 1. P. 25–37.
12. Зув В.В., Мицель А.А., Пташник И.В. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. N 9. С. 970–977.
13. Физические величины / Под. ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 259 с.
14. Air Monitoring by Spectroscopic Techniques / Ed. by Markus W. Sigrist // Chemical Analysis. A Wiley-Interscience Publication. 1994. V. 127. 335 p.
15. Зув В.Е., Комаров В.С. Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 264 с.
16. Креков Г.М., Рахимов Р.Ф. Оптико-локационная модель континентального аэрозоля. Новосибирск: Наука, 1982. 199 с.

*A.I. Karapuzikov, I.V. Ptashnik, O.A. Romanovsky, O.V. Kharchenko, I.V. Sherstov. Possibilities of Application of Helicopter-boorne Lidar Based on Tunable TEA  $\text{CO}_2$  Laser for Detection of Methane Leakages.*

A possibility of the methane emissions of various intensity from pipelines was simulated numerically using the third harmonic of the TEA  $\text{CO}_2$ -laser for a distance of 1 km. An identification of the methane occurred to be possible.