

# Лазерное дистанционное обнаружение утечек природного газа из трубопроводов

В.О.Петухов, В.А.Горобец, Ю.М.Андреев, Г.В.Ланский

*Для обнаружения утечек природного газа из нефтепроводов по измерению содержания этана в атмосфере разработан лидар дифференциального поглощения на основе перестраиваемого ТЕА CO<sub>2</sub>-лазера, работающего на 42 линиях «горячей» полосы 01<sup>1</sup>1–11<sup>1</sup>0 в диапазоне 10.9–11.4 мкм. Чувствительность обнаружения этана составила 0.9 ppm-км. Присутствие метана не искажает результатов измерений. Разработанный лидар может обнаруживать утечки природного газа с километровых высот при скоростях полета до 200 км/ч и частоте следования зондирующих импульсов 5 Гц.*

**Ключевые слова:** CO<sub>2</sub>-лазер, природный газ, зондирование, утечки.

## 1. Введение

Считается, что в настоящее время ежегодный суммарный объем утечек природного газа в процессе его добычи, доставки и использования составляет 10<sup>8</sup> м<sup>3</sup>. Такие потери не только наносят материальный урон, но и представляют серьезную опасность для населения, а также могут привести к изменению климата из-за парникового эффекта. Для дистанционного обнаружения мест утечек из трубопроводов используется целый ряд методов, включая наиболее чувствительный и оперативный оптический метод дифференциального поглощения [1]. Как следует из состава природного газа (табл. 1), обнаружение мест утечек путем измерения избыточной концентрации метана в атмосфере выглядит привлекательным благодаря его высокому содержанию.

Табл. 1. Состав газа месторождений Восточной Сибири [2].

Месторождение	Основные компоненты (масс. %)				
	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> , C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> , C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> , C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	N <sub>2</sub>	He
Ковыктинское	91.39	4.91	1.78	1.52	0.28
Чаяндинское	85.48	4.57	2.58	6.44	0.5
Юрубчено-Тохомское	81.11	7.31	5.06	6.39	0.18
Средне-ботуобинское	88.61	4.95	3.12	2.93	0.2–0.6

Из числа полос поглощения основного (<sup>12</sup>CH<sub>4</sub>) изотопа метана с центрами на длинах волн  $\lambda = 12.8, 7.7, 3.3, 2.3, 1.66, 1.57, 1.34$  и  $0.77$  мкм наибольшее внимание при

разработке различных типов лидаров дифференциального поглощения привлекает интенсивная полоса поглощения среднего ИК диапазона с центром в районе 3.3 мкм. Этому способствует и большое количество доступных лазеров, функционирующих в ее пределах, в отличие от спектральной области самой интенсивной полосы поглощения с центром в районе 7.7 мкм, к тому же сильно перекрытой длинноволновым краем основной полосы поглощения паров воды.

На практике разработка наиболее востребованных дистанционных лидаров работающих в области 3 мкм, представляет большую техническую проблему по целому ряду причин. По сути это область не одной изолированной, а нескольких перекрытых полос поглощения метана, лежащих в пределах длин волн  $\lambda = 3.07 - 3.43, 3.17 - 3.47, 3.12 - 3.56, 3.16 - 3.89$  и  $3.15 - 3.15$  мкм с общим количеством линий поглощения 6508, имеющих интенсивность от  $1 \times 10^{-24}$  до  $2.1 \times 10^{-19}$  см/мол и малую ( $\Delta\nu \sim 0.01$  см<sup>-1</sup>) спектральную ширину. Здесь же расположены интенсивные колебательно-вращательные полосы поглощения многих органических газов, обусловленные наличием связи C–H, а также паров воды. На результатах измерений существенно сказывается возмущающее действие высокого (1.7 ppm) фонового содержания метана при большой эмиссии метана природного и сельскохозяйственного происхождения. Поскольку молекулярный вес метана меньше, чем воздуха, он не накапливается в местах утечек. И наконец, в коммерческой продаже отсутствуют узкополосные перестраиваемые лазеры с высокими энергетическими параметрами, частотой следования импульсов и эксплуатационными характеристиками, работающие в области 3.3 мкм.

Параметры существующих полупроводниковых перестраиваемых лазеров позволяют проводить трассовые измерения и дистанционное обнаружение метана с предельно низким отношением сигнал/шум [3–6] с использованием в качестве отражателей топографических объектов, удаленных на расстояние не более 1 км. Их эмиссионные спектры сложны и сильно зависят от температуры, а пучки излучения имеют многомодовую структуру.

**В.О.Петухов, В.А.Горобец.** Институт физики имени Б.И.Степанова НАНБ, Беларусь, 220072 Минск, просп. Независимости, 68; e-mail: v.petukhov@ifanbel.bas-net.by, v.gorobets@ifanbel.bas-net.by  
**Ю.М.Андреев, Г.В.Ланский.** Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Россия, 634055 Томск, просп. Академический, 10/3; e-mail: yuandreev@imces.ru, lansky@yandex.ru

Поступила в редакцию 11 ноября 2009 г.

Генераторы разностной частоты, преобразующие частоты излучения хорошо отработанных и мощных лазеров видимого и ближнего ИК диапазонов с необходимыми спектральными характеристиками выходного излучения в средний ИК диапазон, малоэффективны из-за отсутствия нелинейных кристаллов с приемлемыми оптическими линейными и нелинейными свойствами [7]. В связи с этим типичные выходные энергетические параметры преобразованного по частоте излучения мало отличаются от параметров полупроводниковых лазеров. Сказанное справедливо и в отношении параметрических узкополосных перестраиваемых генераторов среднего ИК диапазона, формирование спектральных характеристик которых при энергии выходных импульсов, следующих с частотой от единиц до нескольких десятков герц, выше уровня единиц–десятков миллиджоулей являются нерешенными задачами [8–11].

Применение химических лазеров, а также ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазеров с генерацией третьей гармоники или суммарной частоты основного излучения и излучения второй гармоники затруднено случайными совпадениями линий излучения со слабоинтенсивными линиями поглощения, невысокими выходными энергетическими параметрами источников второго типа и сложностью эксплуатации источников обоих типов. Так, из-за малого сечения поглощения реализованная чувствительность обнаружения метана при измерениях на линии  $P_1(9)$  DF-лазера составила 6 ppm·км [12]. Предлагаемое применение третьей гармоники  $\text{CO}_2$ -лазеров, работающих на линиях 10R(20) и 10R(18), 9P(20) и 9P(18), малоперспективно из-за малого сечения поглощения ( $\sigma = 1.8$  и  $1.7 \text{ см}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$ ) и плохого (соответственно  $0.1699$  и  $0.069 \text{ см}^{-1}$ ) совпадения с центрами линий поглощения [13]. Возможности измерений на длине волны  $\lambda = 3.3922 \text{ мкм}$  He–Ne-лазера, совпадающей с линией поглощения  $P(7)$  метана, до предела ограничены малой выходной мощностью, а также возмущающим влиянием линий поглощения паров воды. Малое сечение поглощения ограничивает применение твердотельного  $\text{Co} : \text{MgF}_2$ -лазера ( $\lambda = 1.5 - 3.2 \text{ мкм}$ ) [14]. Исходно малые сечения поглощения на длинах волн более коротковолновых полос поглощения, например  $\sigma = 0.59 \text{ см}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$  на  $\lambda = 1.6449 \text{ мкм}$   $\text{Er}^{3+} : \text{YAG}$ -лазера [15], также ограничивают применение этого лазера. В результате такого положения дел дистанционные лидарные системы обнаружения мест утечек природного газа путем контроля содержания метана в атмосфере имеют невысокие параметры, допускающие их размещение на медленно и низко летящих вертолетах, сдувающих газ с места утечек (табл. 2).

В настоящей работе представлены результаты разработки ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазера с энергией в импульсе излучения  $0.5 - 2 \text{ Дж}$ , перестраиваемого по линиям «горячей» полосы  $01^1 1 - 11^1 0$ , и лидара дифференциального поглощения на его основе для обнаружения мест утечек природного

газа из трубопроводов путем контроля содержания этана в атмосфере.

## 2. $\text{CO}_2$ -лазер

Дистанционный лидарный газоанализ предъявляет к используемым ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазерам особые требования: наряду с высокими энергетическими параметрами выходной пучок излучения должен иметь улучшенный модовый состав, малую расходимость и узкую спектральную ширину линии излучения, расположенной вблизи максимума контура усиления и линии поглощения контролируемого газа. Подробные исследования условий эффективной генерации на линиях нетрадиционных полос излучения  $\text{CO}_2$ -лазеров [17, 18] позволили нам разработать для лидарных систем приборный вариант малогабаритного ( $100 \times 35 \times 40 \text{ см}$ ) и надежного ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазера общим весом  $50 \text{ кг}$  с автоматизированной широкополосной перестройкой по линиям излучения.

Резонатор такого лазера имел длину  $\sim 1 \text{ м}$  и был образован дифракционной решеткой ( $100$  или  $150 \text{ штр./мм}$ , коэффициент отражения в первый порядок не менее  $95\%$ ) и плоским дихроическим зеркалом с коэффициентом отражения  $\sim 85\%$ , через которое осуществляется вывод излучения. Важной особенностью лазера является специфичный состав активной среды ( $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 35 : 30 : 35$ ) при общем относительно невысоком давлении  $P = 200 - 250 \text{ Тор}$ , существенно отличающийся от состава типичных активных сред ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазеров ( $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 20 : 20 : 60$ ,  $P = 760 \text{ Тор}$ ), работающих в области основных полос излучения. Основной разряд с УФ предьонизацией поджигается между профилированными электродами длиной  $70 \text{ см}$  и шириной  $2.5 \text{ см}$ . Межэлектродный промежуток составляет  $2 \text{ см}$ . Конденсаторная накопительная батарея емкостью  $0.2 \text{ мкФ}$  заряжается до  $20 \text{ кВ}$ . Специально разработанная малоиндуктивная ( $\sim 50 \text{ нГн}$ ) система электропитания лазера обеспечивает устойчивый тлеющий разряд в широком диапазоне давлений и состава активной среды при высоком, до  $1000 \text{ Дж} \cdot \text{л}^{-1} \times \text{атм}^{-1}$ , энергокладе.

Такая схема питания и подбор состава активной среды обеспечивают максимальную эффективность генерации на линиях «горячей» ( $01^1 1 - 11^1 0$ ) полосы излучения. При этом эффективность генерации в основной и секвенционных полосах излучения снижается незначительно. При работе в импульсно-периодическом режиме с частотой следования импульсов до  $5 \text{ Гц}$  без прокачки рабочей смеси выходные параметры лазера имеют практически ту же воспроизводимость, что и при работе на активных средах традиционного состава. Описание других конструктивных и технических особенностей разработанного лазера приведено в [17, 18]. В целом лазер генерирует на более чем  $200$  линиях полос излучения – основных ( $00^0 1 - 10^0 0$ ,  $02^0 0$ ), вторых секвенционных ( $00^0 2 - 10^0 1$ ,  $02^0 1$ ) и горячей ( $01^1 1 - 11^1 0$ ).

Табл.2. Параметры отечественных лидарных систем для обнаружения мест утечек природного газа из трубопроводов по измерению содержания метана в атмосфере [16].

Лидарная система	Скорость движения (км/ч)	Высота полета (м)	Обнаружительная способность (ppm·км)	Потребляемая мощность (кВт)	Масса (кг)	Постоянная времени измерений (с)
Обзор-2	60–120	30–70	0.9	1	250	0.15
МАГ-1	60–120	30–100	0.9	0.3	60	0.1–0.3
Аэропоиск	80–120	30–80	–	0.3	40	–

В горячей полосе  $01^{11}-11^{10}$  он способен генерировать на 42 линиях в диапазоне длин волн 10.9–11.4 мкм, от линии P(12) до линии P(53), с выходной энергией  $E_{out} \geq 0.5$  Дж в одиночных импульсах. В диапазоне 11.2–11.3 мкм энергия импульсов излучения составляет 1.0–1.5 Дж, а на наиболее сильных линиях в диапазоне 11.0–11.2 мкм она достигает 2 Дж. Длительность основного пика импульса излучения, содержащего более 60% общей энергии импульса, лежит в пределах 200–250 нс, а полная длительность импульса с азотным «хвостом» излучения достигает 2 мкс. Для наиболее интенсивных линий излучения пиковая мощность превышает 5 МВт. Использование двух диафрагм диаметром 20 мм, последовательно расположенных у дифракционной решетки и выходного зеркала, позволяет получить оптимальное соотношение между энергетическими и спектральными характеристиками лазера. При этом пятно генерации диаметром  $\sim 20$  мм приобретает близкую к круглой форму и однородную пространственную структуру. Расходимость излучения на линиях горячей полосы составляет 1–1.5 мрад, а ширина линии равна  $\sim 0.01$  см $^{-1}$ . Спектральное положение всех линий излучения хорошо известно, они легко спектрально селекционируются из-за большого спектрального расстояния между ними (0.5–2 см $^{-1}$ ) и выбираются для проведения измерений с помощью управляемого компьютером шагового двигателя. Отметим, что число линий в горячей полосе в два раза больше, чем в случае обычных переходов, из-за наличия четных и нечетных переходов.

### 3. Модельные оценки

Модельные спектры поглощения  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$  и приземной атмосферы (модель «лето средних широт», общее давление  $P = 1$  атм,  $T = 296$  К, содержание паров  $\text{H}_2\text{O}$  7750 ppm) при длине измерительной трассы 200 м, рассчитанные по банку данных HITRAN 2004, приведены на рис.1.

Из рис.1 следует, что этан имеет изолированные линии поглощения в районе 3.3 мкм, например в микроокнах прозрачности 3.332–3.334 и 3.335–3.338 мкм, как и метан в пределах 3.3125–3.3145 мкм. При этом спектральная ширина линий поглощения этана в несколько раз больше и они лучше выделены. Однако очевидно, что контроль содержания этана по спектрам поглощения в области 3 мкм должен быть осложнен теми же обстоятельствами, что и контроль метана.

Коротковолновая часть полосы поглощения в области 12 мкм лежит вблизи микроокон прозрачности атмосферы и совпадает с горячей полосой излучения  $\text{CO}_2$ -лазеров  $01^{11}-11^{10}$ . В условиях модельной атмосферы, принятой при расчете рис.1, но без учета малых газовых составляющих атмосферы, взаимное положение линий поглощения этана, паров воды и линий излучения  $\text{CO}_2$ -лазера выглядят так, как показано на рис.2.

Спектральная ширина линий поглощения этана здесь также в несколько раз больше, чем у метана в области 3.3 мкм, и не превышает ширину линий генерации  $\text{CO}_2$ -лазеров. Спектры поглощения наиболее распространенных органических газов в области 12 мкм разнесены, а ослабление атмосферным аэрозолем и включениями минимально, что хорошо для дистанционных лидаров, в которых в качестве отражателей используются топографические объекты.

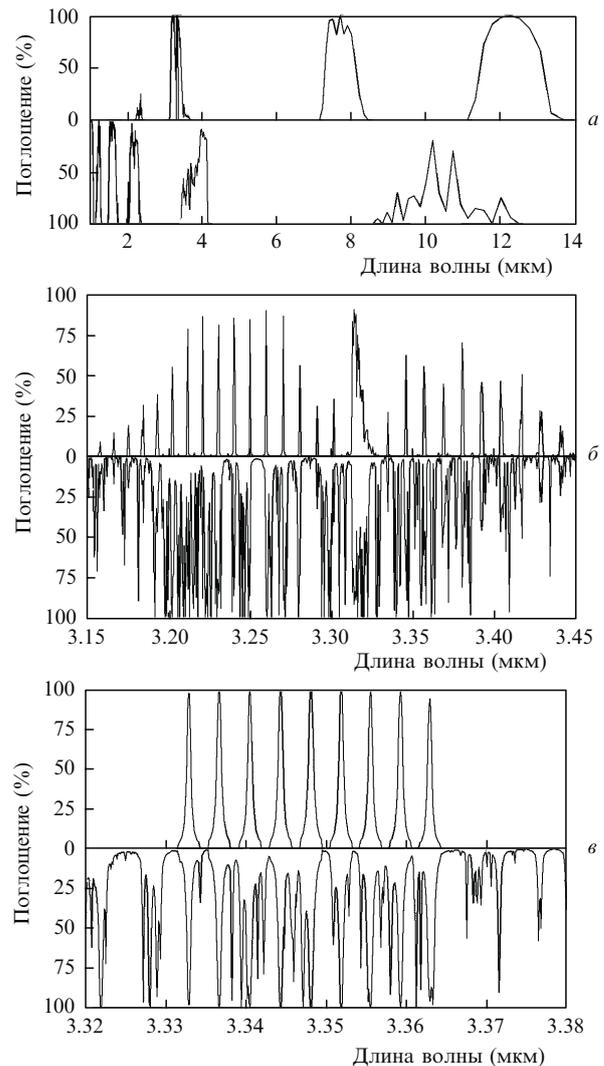


Рис.1. Модельные спектры поглощения 1.7 ppm  $\text{CH}_4$  и 10 ppm  $\text{C}_2\text{H}_6$  (верхняя часть рисунка) и приземной атмосферы (нижняя часть рисунка) со спектральным разрешением 2 см $^{-1}$  (а), а также  $\text{CH}_4$  и атмосферы (б) и  $\text{C}_2\text{H}_6$  и атмосферы (в) со спектральным разрешением 0.05 см $^{-1}$  (верхняя и нижняя части рисунка соответственно).

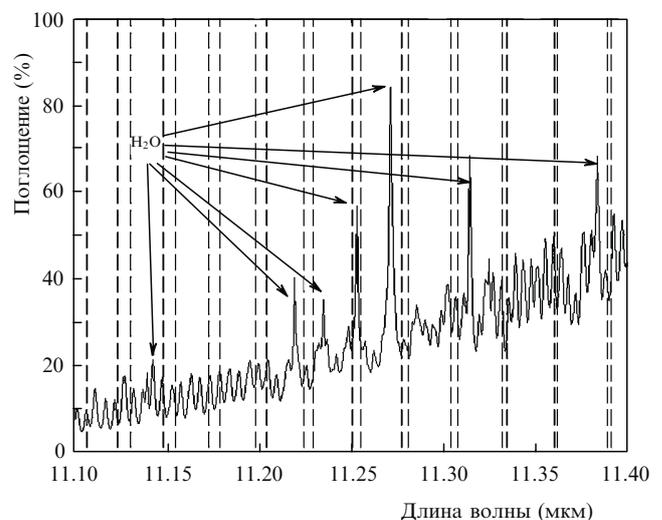


Рис.2. Модельный спектр поглощения 10 ppm  $\text{C}_2\text{H}_6$  на трассе длиной 200 м. Штриховыми линиями отмечены длины волн генерации  $\text{CO}_2$ -лазера в горячей полосе  $01^{11}-11^{10}$ , стрелками – положение линий поглощения паров воды.

Расчеты потенциальных возможностей определения содержания этана в атмосфере выполнены по методике, представленной в [19, 20]. Линия излучения P(31) с длиной волны 11.1069 мкм ( $900.3383 \text{ см}^{-1}$ ) выбрана в качестве опорной, а линии P(39) на 11.2040 мкм ( $892.5395 \text{ см}^{-1}$ ) и P(50) на 11.3601 мкм ( $880.2739 \text{ см}^{-1}$ ) – в качестве on-line линий. Дифференциальное сечение поглощения составляет в этом случае соответственно 0.12 и  $0.23 \text{ см}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$ , а обнаружительная способность – около  $0.9 \text{ ppm} \cdot \text{км}$ . Спектральное расстояние между выбранными парами линий излучения близко к допустимому интервалу  $5-10 \text{ см}^{-1}$ , исключающему влияние селективного аэрозольного поглощения на результаты измерений. Важно также, что выбранные пары лазерных линий достаточно далеко отстоят от линий поглощения паров воды, что не вызывает затруднений при измерениях в условиях повышенной влажности атмосферы.

#### 4. Эксперимент

Разработанный ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазер использовался в лидарных системах (см. гл. 4 и 5 монографии [20]), способных работать на измерительных трассах длиной до 8 и 12 км. Во втором случае в данном исследовании сигнальным детектором служил охлаждаемый КРТ-фотодиод нашего изготовления  $\varnothing 0.1 \text{ мм}$  с постоянной времени около 10 нс и обнаружительной способностью  $2 \times 10^{10} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$ . В опорном канале использовался пироэлектрический детектор PCI-L-3. Vigo System S.A. (Польша) с диапазоном чувствительности 2–12 мкм и постоянной отклика менее 1 нс. Цифровой запоминающий двухканальный осциллограф TDS3052 (Tektronix Inc.) с шириной полосы пропускания 500 МГц служил для контроля временной формы импульсов. С помощью пикового детектора измерялись сигналы опорного и измерительного каналов.

В процессе испытаний, проводимых при различных погодных условиях, установлено, что коэффициент отражения топографических объектов варьируется от нескольких процентов для зданий и листов фанеры до нескольких десятых–сотых долей процента для покрытых травой склонов холмов. При энергии одиночных зондирующих импульсов  $\sim 1 \text{ Дж}$  отношение сигнал/шум на выходе детекторов превысило в сухую погоду  $10^4$ . Предварительно для проверки работоспособности всех систем лидара проведено детектирование малых (фоновых) концентраций  $\text{NH}_3$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{CO}$  и паров  $\text{H}_2\text{O}$  в полевых условиях и реальных условиях города Минска (Беларусь) на длинах волн основной полосы излучения и ее второй гармоники и их сравнение с ранее полученными результатами. Для оценки возможностей обнаружения этана утечка природного газа имитировалась его напуском в атмосферу непосредственно на измерительной трассе, а для калибровочных измерений и определения чувствительности системы по методике [20] – напуском известного количества этана в полихлорвиниловую кювету размером  $0.5 \times 0.5 \times 2 \text{ м}$  с окнами из полиэтиленовой пленки толщиной 100 мкм. Результаты модельных измерений содержания этана в атмосфере после напуска его на измерительную трассу приведены на рис.3. При построении графической зависимости применялась процедура сглаживания.

Калибровка системы показала хорошее соответствие результатов оценок и реализованной чувствительности

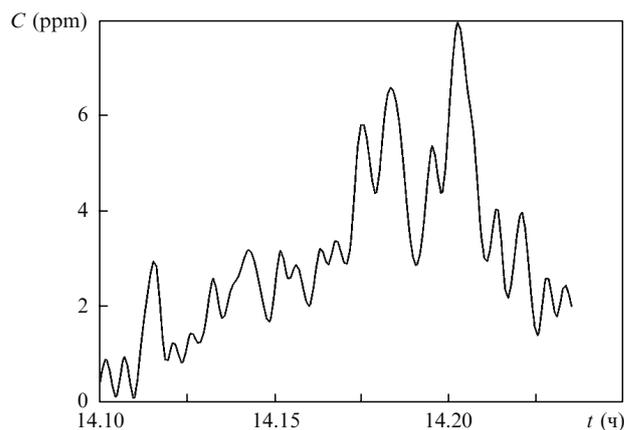


Рис.3. Зависимость изменения содержания этана в атмосфере на приземной трассе длиной 200 м от времени.

измерений  $0.9 \text{ ppm} \cdot \text{км}$ . Как показали оценки, полусферическое облако этана в атмосфере  $\varnothing 30 \text{ м}$  может быть обнаружено при содержании в нем этана 0.1 %. Достоинством использования этана в качестве индикатора мест утечек является его малое фоновое содержание ( $2 \text{ ppb}$ ) в атмосфере, низкий уровень эмиссии естественных и антропогенных источников и сосредоточение в местах утечек из-за большего по сравнению с воздухом молекулярного веса. При полученных энергетических параметрах выходного излучения лазера возможно обнаружение этана с километровых высот при скорости полета до  $200 \text{ км/ч}$  и частоте следования импульсов 5 Гц при расходимости зондирующего пучка  $5-10^\circ$ .

#### 5. Заключение

Разработан малогабаритный ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазер, генерирующий более чем на 200 линиях основных ( $00^01-10^00$ ,  $02^00$ ), вторых секвенционных ( $00^02-10^01$ ,  $02^01$ ) и горячей ( $01^11-11^10$ ) полос излучения. В горячей полосе он способен генерировать на 42 линиях излучения в диапазоне длин волн 10.9–11.4 мкм, от линии P(12) до линии P(53), с выходной энергией 0.5–2 Дж в одиночных импульсах с той же воспроизводимостью, что и при генерации в основных полосах излучения. Разработанный лазер апробирован в качестве источника излучения для дистанционного лидара дифференциального поглощения, используемого с целью обнаружения утечек природного газа по избыточному содержанию этана в атмосфере, в котором отражателями являлись топографические объекты. Чувствительность обнаружения этана составила  $0.9 \text{ ppm} \cdot \text{км}$ . Для создания приборных образцов, работающих по предложенной методике, требуется проведение экспериментальных исследований, учитывающих специфику различных трубопроводов, погодные условия, время года и т. д., и выработка соответствующих технических решений.

Ю.М.Андреев и Г.В.Ланский благодарят Президиум СО РАН за частичную финансовую поддержку данной работы в рамках проекта 30.3.2 программы 30.3 СО РАН, ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. в рамках госконтракта № 02.740.11.0444, а также Президиум СО РАН за поддержку в рамках Программы VII.63.3, проект VII.63.3.1; Г.В.Ланский благодарен за поддержку в рамках постановления № 465 от 21.12.2006 г.

1. Алеев Р.М., Чепурский В.Н., Хоперский Г.Г. Патент РФ № 2073816, F17 D5/02. *Изобретения*, № 5, 225 (1997).
2. Довгань А., Осипов М. *Нефтегазовая вертикаль*, № 7, 30 (2006).
3. Uehara K., Tai H. *Appl. Opt.*, **31**, 809 (1992).
4. Cassidy D.T., Bonnell L.J. *Appl. Opt.*, **27**, 2688 (1988).
5. Cassidy D.T. *Appl. Opt.*, **27** (3), 610 (1988).
6. Petrov K.P., Waltman S., Dlugokensky E.J., Arbone M., Fejer M.M., Tittel F.K., Hollberg L.W. *Appl. Phys. B*, **64**, 567 (1997).
7. Dmitriev V.G., Gurzadyan G.G., Nikogosyan D.N. *Handbook of Nonlinear Optical Crystals* (Berlin: Springer, 1999).
8. Lancaster D.G., Dawes J.M. *Appl. Opt.*, **35**, 4041 (1996).
9. Lee S.W., Zenker T., Chyba T.H. *Proc. 19th Int. Laser Radar Conf., NASA/SP-207671/PT2* (Annapolis, Maryland, 1998, p. 853).
10. Byer R.L., Endermann M. *AIAA J.*, **20**, 395 (1982).
11. Baumgartner R.A., Byer R.L. *Appl. Opt.*, **17**, 3555 (1978).
12. Murray E.R., Van der Laan J.E., Hawley J.G. *Appl. Opt.*, **15**, 3140 (1976).
13. Карапузиков А.И., Пташник И.В., Романовский О.А., Харченко О.В., Шерстов И.В. *Оптика атмосферы и океана*, **12**, 364 (1999).
14. Menyuk N., Killinger D.K. *Appl. Opt.*, **26**, 3061 (1987).
15. White K.O., Watkins W.R. *Appl. Opt.*, **14**, 2812 (1975).
16. Kabanov M.V., Andreev Yu.M., Geiko P.P. *Proc. II Int. Conf. Reduce of Methane Mitigation* (Novosibirsk State Techn. Univ., 2000. p. 5).
17. Bertel' I.M., Petukhov V.O., Churakov V.V., Trushin S.A. *Spectros. Lett.*, **16**, 403 (1983).
18. Горобец В.А., Петухов В.О., Точицкий С.Я., Чураков В.В. *Квантовая электроника*, **22**, 5 (1995).
19. Andreev Yu.M., Do S.W., Razenkov I.A., Sherstov I.V., Kong H.J. *IR Atmospheric Opt.*, **10**, 119 (1997).
20. Андреев Ю.М., Воеводин В.Г., Гейко П.П., Горобец В.А., Ланская О.Г., Петухов В.О., Солдаткин Н.П., Тихомиров А.А. *Лидарные системы и их оптико-электронные элементы* (Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2004).