

Параметрический генератор света в задачах зондирования газовых составляющих атмосферы в спектральном диапазоне 3–4 мкм

Г.Г. Матвиенко^{1,2}, О.А. Романовский^{1,2}, С.А. Садовников¹,
А.Я. Суханов^{1,3}, О.В. Харченко¹, С.В. Яковлев^{1,2*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

³Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40

Поступила в редакцию 3.03.2017 г.

Представлена лазерная система на основе параметрических генераторов света, входящая в состав лидара дифференциального поглощения и обеспечивающая перестраиваемую генерацию наносекундных импульсов излучения в спектральном диапазоне 3–4 мкм. Разработана методика лидарных измерений газовых компонент атмосферы с помощью метода дифференциального поглощения (МДП) и метода дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии (ДОАС). Проведена апробация методики МДП–ДОАС в численном эксперименте для оценки возможностей лидарного зондирования малых газовых составляющих атмосферы. Представлены результаты моделирования лидарных измерений малых газовых составляющих атмосферы в диапазоне 3–4 мкм.

Ключевые слова: атмосфера, лидарное зондирование, МДП, ДОАС, газовые составляющие атмосферы, нелинейные кристаллы; *atmosphere, lidar sounding, DIAL, DOAS, atmospheric trace gas, nonlinear crystals.*

Введение

Развитие лазерных бесконтактных методов диагностики среды (атмосфера, океан) требует разработки лазерных источников излучения, способных генерировать излучение в определенном диапазоне длин волн с малым шагом перестройки по частоте. Современные лидары дифференциального поглощения, как правило, позволяют контролировать лишь несколько газовых компонент атмосферы. Используемые в их составе мощные источники излучения, такие как CO₂-, DF(HF)-лазеры имеют ограниченное число спектральных совпадений линий излучения и линий поглощения атмосферных газов [1]. При этом одновременный спектрально-временной анализ многочастотного отклика атмосферы в принципе не возможен из-за необходимости перестройки частоты излучения. Этого недостатка лишены ИК Фурье-газоанализаторы, однако из-за отсутствия мощных широкополосных источников когерентного излу-

чения в их составе используются маломощные тепловые источники излучения. Они позволяют проводить лишь интегральные измерения с длиной трасс зондирования до нескольких сотен метров с использованием специальных отражателей.

Современные источники лазерного излучения, используемые в задачах лидарного зондирования, созданы на основе широкодиапазонных ИК молекулярных лазеров, а также параметрических преобразователей частоты на основе нелинейных кристаллов, позволяющих путем генерации обертонов, гармоник, суммарных и разностных частот излучения перекрыть спектральный диапазон от 2 до 18 мкм. Для перекрытия ближней и средней ИК-области используется излучение параметрических генераторов света (ПГС) на нелинейных кристаллах [1, 2].

Наземные [3] и самолетные [4] измерения по методу дифференциального поглощения (МДП) используются для получения вертикальных профилей озона в тропосфере и стратосфере [5], тропосферного водяного пара [6], для картирования сильного загрязнения приземного слоя этаном и NO₂, для определения горизонтального распределения NO₂ в выбросах дизельного двигателя [7]. Также МДП может применяться в лидарном зондировании метеорологических параметров атмосферы [8–11].

* Геннадий Григорьевич Матвиенко (mgg@iao.ru); Олег Анатольевич Романовский (goa@iao.ru); Сергей Александрович Садовников (sadsa@iao.ru); Александр Яковлевич Суханов (say@iao.ru); Ольга Викторовна Харченко (olya@iao.ru); Семен Владимирович Яковлев (ysv@iao.ru).

Однако в стандартном МДП должно выполняться требование монохроматичности лазерного излучения. Широкий спектральный профиль лазерного излучения уменьшает эффективный коэффициент поглощения, что снижает чувствительность измерений. Наличие аэрозоля в больших количествах также ведет к существенным ошибкам МДП. Наконец, проблема стандартных измерений МДП — использование только двух длин волн, что означает, что наличие мешающего поглощения сторонними газами не учитывается. Это приводит к ошибкам, вызванным неточностью априорного знания коэффициентов поглощения.

Этих недостатков позволяет избежать метод дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии (ДОАС) [12–15]. ДОАС позволяет проводить спектрально разрешенные измерения в широкой полосе, что обеспечивает идентификацию нескольких газов даже в случае перекрытия полос поглощения. Еще одним преимуществом данного метода является независимость от аэрозольного и молекулярного рассеяния благодаря технике фильтрации высоких частот, используемой для получения спектров. Однако возможности метода ДОАС в получении вертикальных профилей ограничены; в настоящее время проводятся только усредненные по трассе измерения.

Перспективным путем решения этой проблемы является подход, сочетающий преимущества обоих методов — пространственное разрешение МДП и возможность идентификации нескольких газов ДОАС. Новый метод использует широкополосное излучение и спектрометр с ПЗС-детектором, что обеспечивает измерение сигналов обратнорассеянного излучения с разрешением как по высоте, так и по длине волны одновременно.

Цель работы — разработка методики лидарного зондирования малых газовых составляющих (МГС) атмосферы, совмещающей МДП и ДОАС, и ее апробация в численном эксперименте для оценки возможностей зондирования газового состава атмосферы с помощью лазерной системы на основе параметрического преобразования частоты в среднем ИК-диапазоне спектра.

Методика лидарного зондирования МГС атмосферы с помощью МДП и ДОАС

Основной принцип действия лидара дифференциального поглощения заключается в следующем. По мере прохождения атмосферы лазерный пучок ослабляется (в соответствии с законом Ламберта—Бера) молекулярным поглощением и молекулярным и аэрозольным рассеянием. Таким образом, сигнал, зарегистрированный детектором, является функцией этого ослабления, доли обратнорассеянных фотонов, длины пути и мощности лазерного излучения [16].

В свою очередь, МДП определяет концентрации атмосферного газа по разнице лидарных сигналов на длинах волн *on* и *off* с разным молекулярным по-

глощением. Однако поглощение сторонними газами и неоднородности аэрозольного слоя вносят большие ошибки в результат восстановления газовых профилей [17].

Недостатки МДП обусловлены также неточностью априорного знания коэффициентов поглощения на двух и более длинах волн. Метод ДОАС позволяет избежать их посредством измерения пропускания атмосферы с использованием широкополосных источников излучения с полушириной на полувывоте от единиц до сотен нанометров. Молекулярное поглощение (шириной порядка нескольких нанометров) в ДОАС отделяется по закону Ламберта—Бера от рассеяния. Рассеяние слабо зависит от длины волны и может быть удалено с помощью высокочастотного фильтра. Кроме того, путем подбора отношения рассчитанного молекулярного поглощения к наблюдаемому (например, методом наименьших квадратов) возможно одновременное измерение нескольких поглощающих газов. Измерение поглощения той или иной газовой составляющей на большом количестве длин волн позволяет решить проблему использования априорной информации, вносящей искажения в результаты экспериментальных исследований содержания газов в атмосфере [18].

В случае проведения ДОАС-измерений необходимо сначала найти отношение наблюдаемого спектра (P_{OBS}) к референтному (P_{REF}), которое определяется из спектра лазерного источника (P_0), полученного одним и тем же детектором. В качестве P_{REF} обычно используется спектр атмосферы при известном содержании поглощающих газов, например пассивный метод спектроскопии зенитного неба. Рассчитав отношение (P_{OBS}/P_{REF}), можно вычислить значения концентраций газов, входящих в диапазон зондирования [18]:

$$\left(\frac{P_{OBS}(v_j, z_i)}{P_{REF}(v_j, z_i)} \right) = \exp \left(-2\Delta z \sum_{k=0}^j \alpha(v_j, z_k) + \ln(\beta(v_j, z_i)) \Delta z \right) \times \int_{v-\Delta v/2}^{v+\Delta v/2} f(v', v_j) \exp \left(-\Delta z \sum_{k=0}^{i-1} \sum_g^{N_g} (n_g(z_k) K_g(v', z_k) + n_g(z_{k+1}) K_g(v', z_{k+1})) \right) dv', \quad (1)$$

где z — длина трассы зондирования; Δz — шаг пространственной сетки; $\alpha(v_j, z_k)$ — коэффициент ослабления анализируемой среды; $\beta(v_j, z_i)$ — коэффициент обратного рассеяния, включающий молекулярное и аэрозольное рассеяние в направлении назад; Δv — разрешающая способность приемника; $f(v', v_j)$ — аппаратная функция приемника на частоте v_j ; N_g — число учитываемых газов; $K_g(v', z_k)$ — коэффициент поглощения соответствующего газа; $n_g(z_k)$ — концентрация газовой компоненты. Принцип получения полезной информации о концентрациях газовых компонент состоит в проведении минимизации выражения (1) путем подгонки переменных коэффициентов.

Отношение (P_{OBS}/P_{REF}) не зависит от спектра излучения лазерного источника или спектральной

зависимости принимающей оптики, спектрографа, приемника, что является важным преимуществом МДП–ДОАС-методики. Измеряемая таким образом величина – это разница содержания поглощающих газов в референтном случае и в реальной атмосфере [11].

Незначительно изменяющееся рассеяние $\beta(\nu)$ обычно удаляется с помощью фильтра высоких частот. Для этого используются различные методы, но самый простой – применение полинома второго или третьего порядка, который подгоняется к разнице в оптической толще, а затем удаляется, оставляя так называемый дифференциальный спектр или дифференциальную оптическую толщу. Необходимо отметить, что именно этот процесс фильтрации позволяет МДП–ДОАС нивелировать проблему ослабления излучения неизвестным или некорректно учитываемым рассеянием (аэрозольным или рэлеевским), присутствующую МДП [11].

Обычно дифференциальный спектр восстанавливается по нескольким сотням точек, при этом число параметров подгонки не больше шести. Таким образом уравнение (1) становится переопределенным и успешно решается методом наименьших квадратов. В свою очередь, коэффициенты подгонки варьируются для получения наилучшего совпадения подгоночного и наблюдаемого спектров. В общем случае разрешение метода соответствует молекулярному поглощению, при котором выполняется закон Ламберта. В этом случае, если известны коэффициенты поглощения, можно определить концентрацию каждого газа. Важным преимуществом МДП–ДОАС по сравнению с МДП является возможность одновременно определения концентрации нескольких газов [11].

Разработанная методика лидарных МДП–ДОАС-измерений включает три блока (рис. 1): 1) поисковый; 2) расчетный; 3) блок обработки экспериментальных результатов лидарного зондирования.

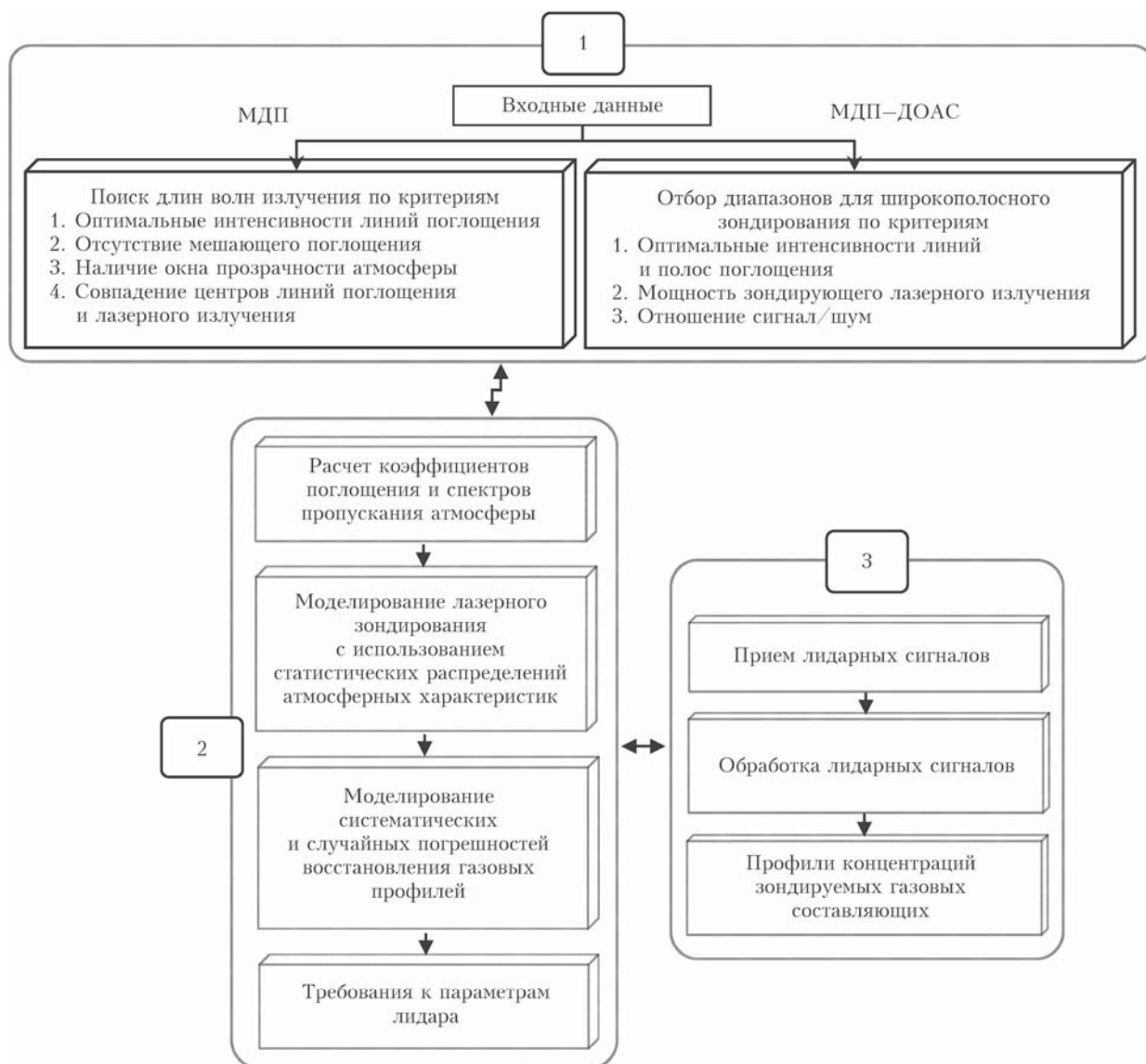


Рис. 1. Схема методики планирования и проведения лидарных МДП–ДОАС-измерений

В МДП–ДОАС-системах диапазоны зондирования выбираются по следующим критериям: оптимальные интенсивности линий и полос поглощения определяются характеристиками приемного устройства лидара; минимальная интенсивность линий поглощения должна соответствовать пространственному разрешению фотоприемного прибора, величине его суммарных шумов, а также концентрациям исследуемых газовых компонент. Данные критерии определяются спецификой метода, состоящего в восстановлении информации о концентрациях газовых компонент атмосферы посредством нахождения отношения мощностей двух сигналов – опорного (или референтного) и сигнального.

В качестве входных данных выступают параметры трассы зондирования, тип трассы (горизонтальная, вертикальная или наклонная), характеристики источника излучения (ширина линии излучения, мощность) и приемной аппаратуры (спектральное и пространственное разрешение детектируемых сигналов).

Поиск проводится с использованием базы спектроскопических данных [19], метеомоделей [20], априорной информации о коэффициентах аэрозольного ослабления, обратного [21] и молекулярного рассеяния [22].

Результаты моделирования и поиска информативных пар длин волн для МДП и диапазонов длин волн для МДП–ДОАС-методики представляются в табличной и графической формах.

Методика применима для реализации систем с традиционным функционалом МДП- и ДОАС-подходов по отдельности и для перспективного комбинированного МДП–ДОАС-подхода с использованием одной и той же аппаратуры.

Результаты моделирования лидарных измерений МГС атмосферы в диапазоне 3–4 мкм

Описанная выше комбинированная методика была апробирована с целью оценки возможностей лидарного зондирования газовых компонент атмосферы с помощью лазерной системы на основе ПГС, обеспечивающей перестраиваемую генерацию наносекундных импульсов излучения в спектральном диапазоне 3–4 мкм [23]. Внешний вид лазерной системы представлен на рис. 2.

В качестве источника излучения используется ПГС на нелинейном кристалле КТА (основные функциональные элементы источника излучения: Nd:YAG импульсный лазер LQ529B и преобразователь излучения с перестройкой длины волны 3–4 мкм). Для проверки корректной работы лазера во всем диапазоне перестройки длины волны проведены экспериментальные измерения энергии импульсов пироэлектрическими датчиками PE10-C, PE25-C. Результаты измерения энергетических характеристик лазера представлены на рис. 3.

Видно, что в диапазоне длин волн 3–4 мкм ПГС на кристалле КТА имеет довольно высокую энер-

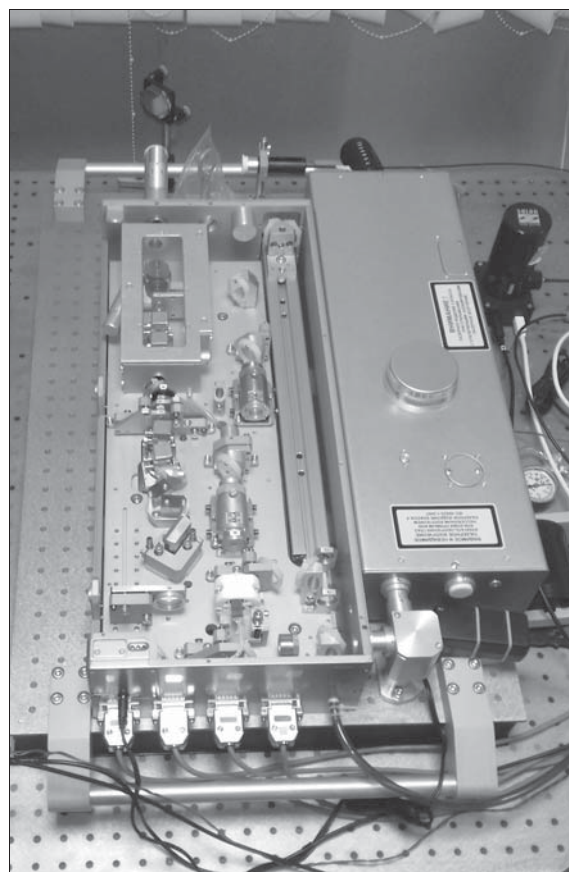


Рис. 2. Внешний вид лазерной системы

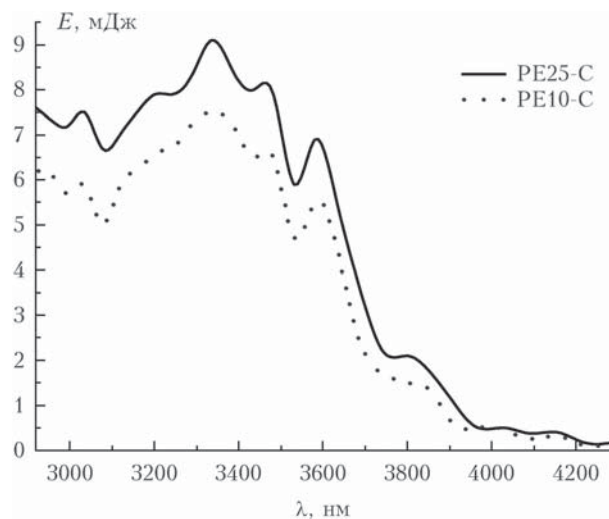


Рис. 3. Зависимость энергии импульса от длины волны излучения при использовании в качестве приемников излучения пироэлектрических датчиков PE10-C, PE25-C

гию в импульсе на выходе системы (в максимуме перестроечной кривой ее значения достигают 9 мДж).

Используя характеристики лазера [23], проведено численное моделирование зондирования некоторых газовых составляющих в атмосфере на приземных тропосферных трассах (на высотах до 5 км и при длинах горизонтальных трасс до 10 км).

При моделировании использовалась стандартная модель атмосферы лета средних широт [20]. Учитывалось мешающее поглощение всех основных атмосферных газовых компонент. Входные данные численного эксперимента представлены в табл. 1.

Таблица 1
Входные данные для численного моделирования лазерного зондирования

Параметр лидарной системы	Значение параметра
Площадь приемника $A_{\text{приемн}}$ ($D = 0,3$ м)	$7 \cdot 10^{-8}$ км ²
Ширина аппаратной функции	1 см ⁻¹
Эффективность приемной системы	0,3
Пространственное разрешение ΔR	1 км
Максимальная энергия в импульсе	9 мДж
Частота следования импульсов	10 Гц
Длительность импульса	10 нс
Расходимость излучения	2 мрад
Диапазон перестройки лазера	3–4 мкм
NEP фотодетектора	10^{-12} Вт

В табл. 2 приведены информативные длины волн, пригодные для зондирования исследуемых в работе малых газовых составляющих атмосферы методом МДП–ДОАС.

На рис. 4 и 5 приведены рассчитанные для вертикальной и горизонтальной тропосферных трасс пространственно и спектрально разрешенные лидарные сигналы для CH_4 (а), H_2CO (б), HBr (в) и HCl (г) в области информативных длин волн МГС атмосферы, представленных в табл. 2. Видно, что во всем рассматриваемом диапазоне высот 0–5 км и длин горизонтальных трасс 0–10 км уровень лидарных сигналов превышает уровень эквивалентной мощности шума фотоприемника $\text{NEP} = 10^{-12}$ Вт.

Результаты численного моделирования показывают возможность восстановления лидарного сигнала на вертикальных трассах до 5 км, на горизонтальных трассах до 10 км при зондировании излучением ПГС на кристалле КТА в диапазоне 3–4 мкм метана, формальдегида, бромоводорода и хлороводорода.

Заключение

Применение разработанной методики лидарного зондирования МГС атмосферы, совмещающей МДП и ДОАС, и ее апробация в численном эксперименте подтверждают возможность использования выбранных информативных длин волн для лидарного зондирования газового состава атмосферы с помощью лазерной системы на основе ПГС в диапазоне спектра 3–4 мкм. Проведенное численное моделирование показывает, что лазер с ПГС на основе нелинейного кристалла КТА является перспективным источником излучения для дистанционного зондирования методом МДП–ДОАС, рассматриваемым в работе МГС атмосферы на приземных тропосферных трассах.

Конструкция используемой лазерной системы предусматривает возможность сужения линии лазерного

Таблица 2

Длины волн, пригодные для зондирования метана, формальдегида, бромоводорода и хлороводорода

Газ	$\lambda_{\text{полг}}$, мкм (в воздухе)	$\nu_{\text{полг}}$, см ⁻¹ (в воздухе)	$T_{\text{газа}}$	$T_{\text{меш. полг}}$
CH_4	3,46490 – on-line	2886,078	0,86	0,91
	3,46395 – off-line	2886,877	0,90	0,93
	3,42746 – on-line	2917,607	0,60	0,72
	3,42962 – off-line	2915,774	0,98	0,98
	3,41537 – on-line	2927,932	0,46	0,61
	3,41716 – off-line	2926,406	0,93	0,94
H_2CO	3,39101 – on-line	2948,970	0,32	0,46
	3,38844 – off-line	2951,210	0,97	0,97
	3,72324 – on-line	2687,449	0,85	0,99
	3,72100 – off-line	2685,832	0,92	0,98
	3,46827 – on-line	2883,273	0,61	0,98
	3,46696 – off-line	2884,371	0,78	0,96
HBr	3,45081 – on-line	2897,864	0,42	0,91
	3,44928 – off-line	2884,371	0,83	0,98
	3,95955 – on-line	2525,539	0,82	0,99
	3,96269 – off-line	2523,538	0,99	0,99
	3,98730 – on-line	2507,962	0,79	0,99
	3,99005 – off-line	2506,234	0,99	0,99
HCl	4,01634 – on-line	2489,829	0,79	0,99
	4,01279 – off-line	2492,031	0,99	0,99
	4,04642 – on-line	2471,320	0,81	0,97
	4,05281 – off-line	2467,423	0,98	0,98
	4,07744 – on-line	2452,519	0,85	0,97
	4,07180 – off-line	2455,916	0,99	0,99
HCl	3,48950 – on-line	2865,740	0,64	0,89
	3,49548 – off-line	2860,837	0,98	0,98
	3,51576 – on-line	2844,335	0,57	0,91
	3,51985 – off-line	2841,030	0,95	0,96
	3,54318 – on-line	2821,829	0,52	0,85
	3,54770 – off-line	2818,727	0,96	0,96
HCl	3,57191 – on-line	2799,622	0,60	0,93
	3,57690 – off-line	2795,716	0,97	0,97

излучения в пределах 0,01–0,05 см⁻¹. Возможность такой модернизации, наряду с малым шагом перестройки линии лазерного излучения и наличием в рассматриваемом спектральном диапазоне линий поглощения других газовых составляющих, и в частности атмосферных загрязнителей, делает указанный лазерный источник уникальным прибором для создания на его основе лидара дифференциального поглощения наземного базирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-45-700722 в части проведения численного моделирования пространственно и спектрально разрешенных лидарных сигналов МГС атмосферы, гранта Президента РФ № МК-1367.2017.5 для поддержки молодых российских ученых в части разработки комбинированной методики лидарных МДП–ДОАС-измерений и гранта Президента РФ по поддержке ведущих научных школ НШ-8199.2016.5.

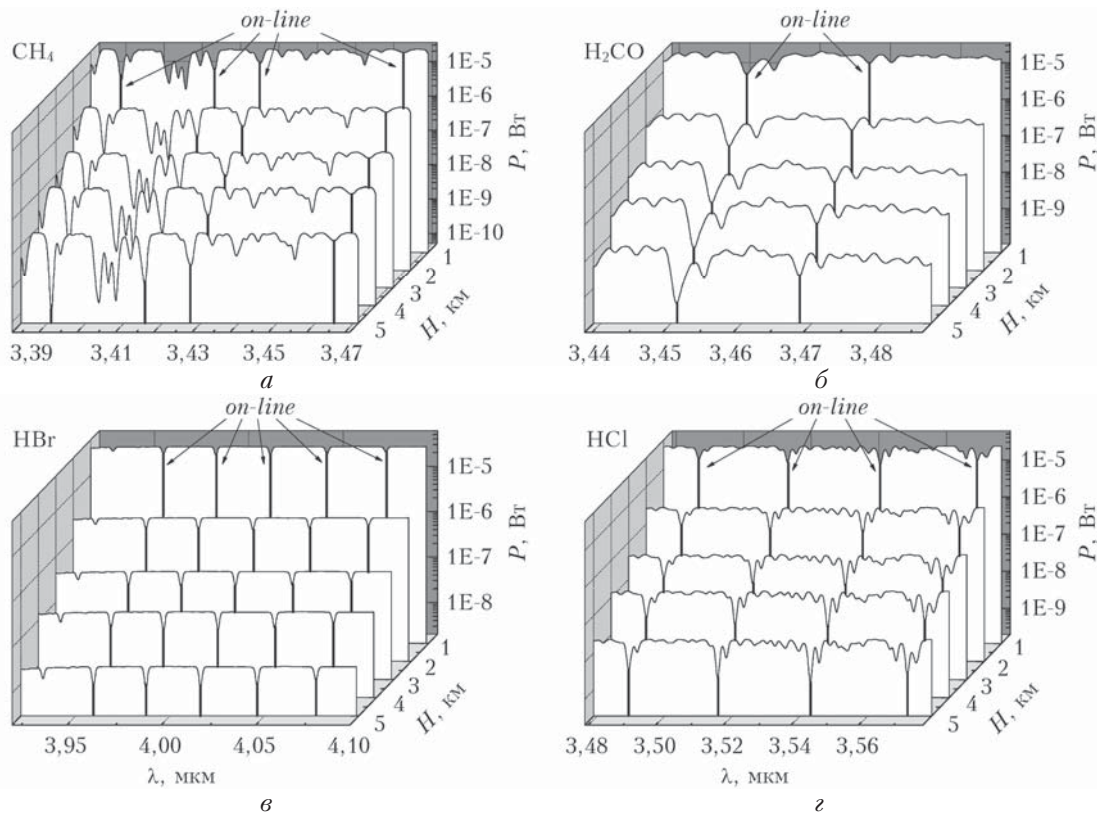


Рис. 4. Пространственно и спектрально разрешенные лидарные сигналы вертикального зондирования метана (а), формальдегида (б), бромоводорода (в) и хлороводорода (г) в области работы ПГС на основе кристалла КТА (ширина аппаратной функции 1 см^{-1})

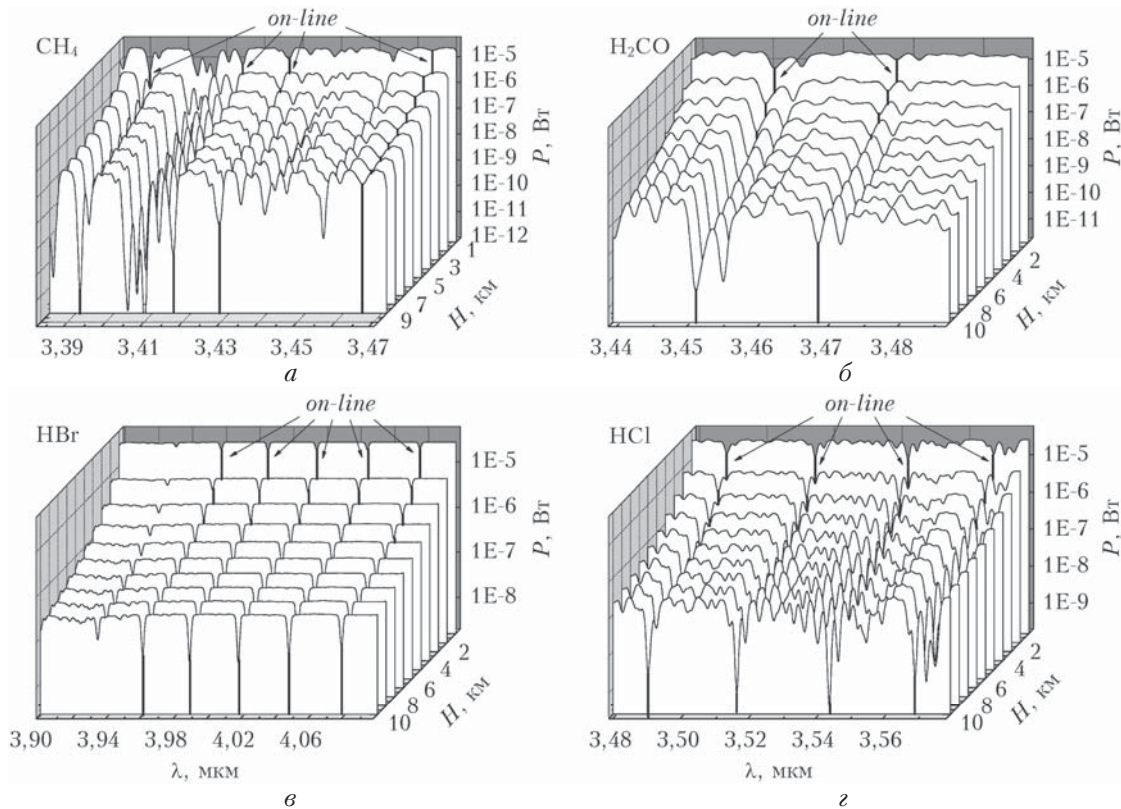


Рис. 5. Пространственно и спектрально разрешенные лидарные сигналы горизонтального зондирования метана (а), формальдегида (б), бромоводорода (в) и хлороводорода (г) в области работы ПГС на основе кристалла КТА (ширина аппаратной функции 1 см^{-1})

1. Васильев Б.И., Маннун У.М. ИК-лидары дифференциального поглощения для экологического мониторинга окружающей среды // Квант. электрон. 2006. Т. 36, № 9. С. 801–820.
2. Mitev V., Babichenko S., Bennes J., Borelli R., Dolfi-Bouteyre A., Fiorani L., Hespel L., Huet T., Palucci A., Pistilli M., Puiu A., Rebane O., Sobolev I. Mid-IR DIAL for high-resolution mapping of explosive precursors // Proc. SPIE. 2013. V. 8894. P. 88940S-1–88940S-13.
3. Sunesson J.A., Apituley A., Swart D.P.J. Differential absorption lidar system for routine monitoring of tropospheric ozone // Appl. Opt. 1994. V. 33, N 30. P. 7045–7058.
4. Browell E.V. Differential absorption lidar sensing of ozone // Proc. IEEE. 1989. V. 77, N 3. P. 419–432.
5. McGee T.J., Gross M., Singh U.N., Butler J.J., Kimvilakani P.E. Improved stratospheric ozone lidar // Opt. Eng. 1995. V. 34, N 5. P. 1421–1430.
6. Higdon N.S., Browell E.V., Ponsardin P., Grossmann B.E., Butler C.F., Chyba T.H., Mayo M., Allen R.J., Heuser A.W., Grant W.B., Ismail S., Mayor S.D., Carter A.F. Airborne differential absorption lidar system for measurements of atmospheric water vapor and aerosols // Appl. Opt. 1994. V. 33, N 27. P. 6422–6438.
7. Toriumi R., Tai H., Takechi N. Tunable solid-state blue laser differential absorption lidar system for NO₂ monitoring // Opt. Eng. 1996. V. 35, N 8. P. 2371–2375.
8. Харченко О.В. Методика планирования и проведения лидарных измерений профилей метеорологических параметров атмосферы // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 6. С. 523–528.
9. Матвиенко Г.Г., Романовский О.А., Харченко О.В., Яковлев С.В. Результаты моделирования лидарных измерений профилей метеопараметров с помощью обертонового СО-лазера // Оптика атмосфер. и океана. 2014. Т. 27, № 2. С. 123–125; Matvienko G.G., Romanovskii O.A., Kharchenko O.V., Yakovlev S.V. Simulation of lidar measurements of profiles of atmospheric meteorological parameters using on overtone CO laser // Atmos. Ocean. Opt. 2014. V. 27, N 4. P. 310–312.
10. Романовский О.А., Харченко О.В., Яковлев С.В. Применение многоволновых ИК-лазеров для лидарных и трассовых измерений метеорологических параметров атмосферы // Изв. вузов. Физика. 2014. Т. 57, № 10. С. 74–80.
11. Бобровников С.М., Матвиенко Г.Г., Романовский О.А., Сериков И.Б., Суханов А.Я. Лидарный спектроскопический газоанализ атмосферы. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2014. 510 с.
12. Platt U., Perner D., Patz H.W. Simultaneous measurement of atmospheric CH₂O, O₃, and NO₂ by differential optical absorption // J. Geophys. Res. C. 1979. V. 84, N 10. P. 6329–6335.
13. Platt U. Differential optical absorption spectroscopy (DOAS) // Air Monitoring by Spectroscopic Techniques / Ed. by M.W. Sigrist. New York: John Wiley & Sons, 1994. P. 27–84.
14. Platt U., Stutz J. Differential optical absorption spectroscopy. New York; Berlin; Heidelberg: Springer, 2008. 593 p.
15. Douard M., Bacis R., Rambaldi P., Ross A., Wolf J.-P., Fabre G., Stringat R. Fourier-transform lidar // Opt. Lett. 1995. V. 20, N 20. P. 2140–2142.
16. Schotland R.M. The determination of the vertical profile of atmospheric gases by means of a ground based optical radar // Proc. of the Third Symposium on Rem. Sens. Environ. Michigan, Ann Arbor, 1964. P. 215–224.
17. Kovalev V.A., Eichinger W.E. Elastic lidar: Theory, practice, and analysis methods. New Jersey: John Wiley & Sons, 2004. 615 p.
18. Romanovskii O.A., Sadovnikov S.A., Kharchenko O.V., Shumsky V.K., Yakovlev S.V. Optical parametric oscillators in lidar sounding of trace atmospheric gases in the 3–4 μm spectral range // Opt. Mem. Neural Networks (Inf. Opt.). 2016. V. 25, N 2. P. 88–94.
19. Rothman L.S., Gordon I.E., Babikov Y., Barbe A., Benner Ch.D., Bernath P.F., Birk M., Bizzocchi L., Bouillon V., Brown L.R., Campargue A., Chance K., Cohen E.A., Coudert L.H., Devi V.M., Drouin B.J., Fayt A., Flaud J.-M., Gamache R.R., Harrison J.J., Hartmann J.-M., Hill C., Hodges J.T., Jacquemart D., Jolly A., Lamouroux J., Le Roy R.J., Li G., Long D.A., Lyulin O.M., Mackie C.J., Massie S.T., Mikhailenko S., Müller H.S.P., Naumenko O.V., Nikitin A.V., Orphal J., Perevalov V., Perrin A., Polovtseva E.R., Richard C., Smith M.A.H., Starikova E., Sung K., Tashkun S., Tennyson J., Toon G.C., Tyuterev V.I., Wagner G. The HITRAN-2012 molecular spectroscopic database // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2013. V. 130. P. 4–50.
20. Зуев В.Е., Комаров В.С. Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 264 с.
21. Креков Г.М., Рахимов Р.Ф. Оптико-локационная модель континентального аэрозоля. Новосибирск: Наука, 1982. 199 с.
22. McClatchey R.A., Fenn R.W., Selby J.E.A. Optical properties of atmosphere. Report AFCRL-71-0297 (Bedford, Mass., 1971). 86 p.
23. Romanovskii O.A., Kharchenko O.V., Kondratyuk N.V., Protaseny A.L., Shumskii V.K., Sadovnikov S.A., Yakovlev S.V. OPO-laser system for atmospheric sounding in the mid-IR range // Proc. SPIE. 2015. V. 9680. DOI: 10.1117/12.2205674.

G.G. Matvienko, O.A. Romanovskii, S.A. Sadovnikov, A.Ya. Sukhanov, O.V. Kharchenko, S.V. Yakovlev. **Optical parametric oscillator in lidar sensing of atmospheric gases in the 3–4 μm spectral range.**

An OPO-based laser system is presented, which is a part of a differential absorption lidar and provides for tunable generation of nanosecond pulses in the 3–4 μm spectral range. The DIAL–DOAS technique for lidar measurements of atmospheric gases is developed and tested in numerical simulation with the aim of estimating the lidar capabilities of sensing atmospheric trace gases. The simulation results of lidar measurements of atmospheric trace gases in the 3–4 μm range are described.