

УДК 551.510.532; 551.501.816

## ПРИМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА СВЕТА ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА АТМОСФЕРЫ В ДИАПАЗОНЕ СПЕКТРА 3–4 МКМ

Романовский Олег Анатольевич<sup>1,2</sup>,  
roa@iao.ru

Садовников Сергей Александрович<sup>1</sup>,  
sadsa@iao.ru

Суханов Александр Яковлевич<sup>1,3</sup>,  
say@iao.ru

Харченко Ольга Викторовна<sup>1</sup>,  
olya@iao.ru

Яковлев Семён Владимирович<sup>1,2</sup>,  
ysv@iao.ru

<sup>1</sup> Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1.

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

<sup>3</sup> Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.

**Актуальность работы** обусловлена необходимостью развития методов и систем дистанционного зондирования атмосферы для обеспечения оперативного мониторинга состояния окружающей среды.

**Цель работы:** разработка методики планирования и проведения лазерного дистанционного зондирования малых газовых составляющих атмосферы посредством подхода, объединяющего преимущества метода дифференциального поглощения (МДП) и дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии (ДОАС), поиск информативных длин волн в среднем ИК-диапазоне, численное моделирование лидарного зондирования малых газовых составляющих атмосферы на выбранных длинах волн.

**Методы исследования:** метод дифференциального поглощения, метод численного моделирования лидарных сигналов.

**Результаты.** Исследованы возможности применения лазерной системы с параметрической генерацией света на основе нелинейного кристалла  $\text{KTiOAsO}_4$  для лидарного зондирования атмосферы в диапазоне спектра 3–4 мкм. Разработана методика лидарных измерений газовых компонент атмосферы с помощью методов дифференциального поглощения и дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии. Проведена апробация разработанной методики для оценки возможностей лидарного зондирования малых газовых составляющих атмосферы. Представлены результаты моделирования лидарных измерений малых газовых составляющих атмосферы в диапазоне 3–4 мкм, показывающие возможность восстановления лидарного сигнала на вертикальных трассах до 5 км, на горизонтальных трассах до 10 км при зондировании метана, формальдегида, бромоводорода и хлороводорода, используя лазерное излучение с шириной аппаратной функции  $2 \text{ см}^{-1}$ .

**Вывод.** Лазер с параметрической генерацией света на основе нелинейного кристалла  $\text{KTiOAsO}_4$  с рабочим диапазоном 3–4 мкм является перспективным источником излучения для дистанционного зондирования рассматриваемых в работе малых газовых составляющих атмосферы на приземных тропосферных трассах с применением разработанной методики.

### Ключевые слова:

Атмосфера, лидарное зондирование, МДП, ДОАС, газовые составляющие атмосферы, нелинейные кристаллы.

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  $\text{CO}_2$ , 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 излучения в их составе используются маломощные тепловые источники излучения. Они позволяют проводить лишь интегральные измерения с длиной измерительных трасс до нескольких сот метров с использованием специальных отражателей.

Современные источники лазерного излучения для решения задач 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 лазеров перекрыть спектральный диапазон от 2 до 18 мкм. Для перекрытия ближней и средней ИК-областей используется излучение параметрических генераторов света (ПГС) на нелинейных кристаллах [1, 2].

Наземные [3] и самолетные [4] измерения по методу дифференциального поглощения (МДП) использовались для получения вертикальных профилей озона в тропосфере и стратосфере [5, 6], тропосферного водяного пара [7], для картирования сильного загрязнения приземного слоя этаном и NO<sub>2</sub>, определения горизонтального распределения NO<sub>2</sub> в выбросах дизельного двигателя [8]. Также МДП может быть использован в лидарном зондировании метеорологических параметров атмосферы [9–12].

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 ведёт к существенным ошибкам МДП. Наконец, проблема стандартных измерений МДП, использующих только две длины волны, означает, что наличие мешающего поглощения сторонними газами не учитывается, что приводит к ошибкам, вызванным неточностью априорного знания коэффициентов поглощения.

Этих недостатков позволяет избежать метод дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии (ДОАС) [13–16]. ДОАС позволяет проводить спектрально разрешенные измерения в широкой полосе, что обеспечивает идентификацию нескольких газов даже в случае перекрытия полос поглощения. Ещё одним преимуществом метода является независимость от аэрозольного и молекулярного рассеяния благодаря технике фильтрации высоких частот, используемой для получения спектров. Однако возможности метода ДОАС для получения вертикальных профилей ограничены, в настоящее время проведены только усреднённые по трассе измерения.

Перспективным путем решения проблемы является метод, сочетающий преимущества обоих методов – пространственное разрешение МДП и идентификацию газов ДОАС. Новый метод использует широкополосное излучение и спектрометр с ПЗС-детектором, что обеспечивает измерение сигнала обратного рассеянного излучения с разрешением как по высоте, так и по длине волны одновременно.

Целью работы является разработка методики лидарного зондирования малых газовых соста-

вляющих (МГС) атмосферы, совмещающей МДП и ДОАС, и ее апробация в численном эксперименте для оценки возможностей лидарного зондирования газового состава атмосферы с помощью созданной лазерной системы на основе ПГС в диапазоне спектра 3–4 мкм.

#### Методика лидарного зондирования МГС атмосферы с помощью МДП и ДОАС

Основной принцип действия лидара ДП заключается в том, что часть обратного рассеянного лазерного излучения преобразуется молекулами и аэрозольными частицами при прохождении через атмосферу. 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 обратного рассеянных фотонов, длины пути и мощности лазерного излучения. Сигнал  $P_R$  из рассеивающего слоя толщиной  $\Delta z$  можно представить в виде

$$P_R(z, \lambda) = P_0(\lambda) \frac{A_p}{z^2} \eta(\lambda) O(z) \Delta z \beta(z, \lambda) e^{-2\tau(z, \lambda)}, \quad (1)$$

где  $P_0(\lambda)$  – мощность лазерного излучения;  $A_p$  – площадь приемного телескопа;  $O(z)$  – область перекрытия между лазерным лучом и полем зрения приемника;  $\beta(z, \lambda)$  – объемный коэффициент обратного рассеянного излучения;  $\eta(\lambda)$  – эффективность приемо-передающей системы;  $\Delta z$  – пространственное разрешение по трассе зондирования;  $\tau(z, \lambda)$  – объемный коэффициент ослабления.

МДП заключается в определении концентрации атмосферного газа по разнице лидарных сигналов на длинах волн on- и off- с разным молекулярным поглощением. Концентрация исследуемого газа определяется следующим образом:

$$n(z) = \frac{1}{2\Delta\sigma_{abs}\Delta z} \ln \left( \frac{P_R(z, \lambda_{on})P_R(z + \Delta z, \lambda_{off})}{P_R(z, \lambda_{off})P_R(z + \Delta z, \lambda_{on})} \right), \quad (2)$$

где  $\Delta\sigma_{abs}$  – сечение поглощения.

Это выражение справедливо только в случае, если мешающее поглощение другими газами мало и рассеивающие свойства аэрозольных частиц не изменяются в диапазонах  $\Delta\lambda$  и  $\Delta z$ . Следствием влияния мешающего поглощения и неоднородности аэрозольного слоя являются большие ошибки восстановления профилей газов.

Недостатки МДП обусловлены неточностью априорного знания коэффициентов поглощения на двух и более длинах волн. Метод ДОАС позволяет избежать их посредством проведения мониторинга пропускания атмосферы с использованием широкогополосных источников излучения с полупроводниковой на полувысоте от единиц до сотен нм. Молекулярное поглощение (шириной порядка нескольких нм) в ДОАС отделяется от рассеяния по закону Ламберта–Бера, которое слабо зависит от длины

волны и может быть удалено с помощью высококачественного фильтра. Кроме того, возможно, путем подбора (например, методом наименьших квадратов) рассчитанного молекулярного поглощения к наблюдаемому, одновременное измерение нескольких поглощающих газов. Измерение поглощения той или иной газовой составляющей на большом количестве длин волн позволяет решить проблему применения априорной информации, вносящей искажения в результаты экспериментальных исследований содержания газов в атмосфере.

В случае проведения ДОАС-измерений в первую очередь необходимо 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 ( $P_{OBS}/P_{REF}$ ) и проведя минимизацию выражения (3) путём подгонки переменных коэффициентов, можно вычислить значения концентраций газов, входящих в диапазон зондирования:

$$\begin{aligned} & \left( \frac{P_{OBS}(v_j, z_i)}{P_{REF}(v_j, z_i)} \right) = \\ & = \exp \left( -2\Delta z \sum_{k=0}^j \alpha(v_j, z_k) + \ln(\beta(v_j, z_i)) \right) \times \\ & \quad \times \int_{v-\Delta v/2}^{v+\Delta v/2} f(v, v_j) \times \\ & \quad \times \exp \left( -\Delta z \sum_{k=0}^{i-1} \sum_g \left( n_g(z_k) K_g(v, z_k) + \right. \right. \\ & \quad \left. \left. + n_g(z_{k+1}) K_g(v, z_{k+1}) \right) \right) dv, \quad (3) \end{aligned}$$

где  $\alpha(v_j, z_k)$  – коэффициент ослабления анализируемой среды;  $\beta(v_j, z_i)$  – коэффициент обратного рассеяния, включающий молекулярное и аэрозольное рассеяние в направлении назад;  $\Delta v$  – 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.

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 составляет разницу содержания поглощающих газов в референтном случае и в случае реальной атмосферы.

Незначительно изменяющееся рассеяние  $\beta(v)$  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 толщине, а затем удаляется, оста-

вляя так называемый дифференциальный спектр или дифференциальную оптическую толщину. Необходимо отметить, что именно этот процесс фильтрации позволяет МДП–ДОАС нивелировать проблемы ослабления неизвестным или некорректно учитываемым рассеянием (аэрозольным или Рэлеевским), присутствием МДП.

Обычно дифференциальный спектр восстанавливается по нескольким сотням точек, при этом число параметров подгонки составляет не более шести. Таким образом, уравнение (3) становится переопределённым и успешно решается методом наименьших квадратов. В свою очередь, коэффициенты подгонки варьируются для получения наилучшего совпадения спектра подгонки и наблюдаемого спектра. 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 одновременного определения концентрации нескольких газов.

Разработанную методику планирования и проведения лидарных МДП–ДОАС измерений можно представить в виде трёх частей, приведённых на рис. 1: 1) поисковая часть (белые блоки); 2) расчётная (серые); 3) блок обработки экспериментальных результатов лидарного зондирования.

Известно, что выражение для минимально обнаружимых концентраций в экспериментах с использованием ДП при лидарном зондировании имеет следующий вид [16]:

$$N(z) = \frac{\ln P(v_{ON}, z) - \ln P(v_{OFF}, z)}{2\Delta K(v)z}, \quad (4)$$

где  $P(v_{ON}, z)$  и  $P(v_{OFF}, z)$  – сигналы, регистрируемые фотоприемником с трассы зондирования длиной  $z$  на частотах  $v_{ON}$  и  $v_{OFF}$ , расположенные в узком спектральном диапазоне линии поглощения исследуемого газа и в соседнем окне прозрачности, а  $\Delta K(v)$  – дифференциальный коэффициент поглощения:

$$\Delta K(v) = K(v_{ON}) - K(v_{OFF}), \quad (5)$$

где  $K(v_{ON})$  и  $K(v_{OFF})$  – коэффициенты поглощения в и вне линии поглощения.

Для большинства реальных устройств регистрации и цифровой обработки, применяемых в экспериментах, значение разности логарифмов в выражении (4) должно удовлетворять условию [17]:

$$\ln P(v_{ON}, z) - \ln P(v_{OFF}, z) \approx 0,02. \quad (6)$$

С учётом выражения (6) значения минимальных интенсивностей линий поглощения можно определить путём моделирования и сравнения спектров пропускания атмосферы анализируемой газовой компоненты и мешающих составляющих с концентрациями соответствующими ПДК для трассы длиной 10 км [12].



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

Fig. 1. Scheme of planning technique and DIAL-DOAS lidar measurements

В случае реализации МДП-ДОАС систем оптимальные интенсивности линий и полос поглощения выбираются исходя из характеристик приёмного устройства лидара. Минимальная интенсивность линий поглощения должна соответствовать пространственному разрешению фотоприёмного прибора, величине его суммарных шумов, а также концентрациям исследуемых газовых компонент. Данные критерии определяются спецификой метода, сущность которого заключается в извлечении 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 приёмной аппаратуры (спектральное и пространственное разрешение детектируемых сигналов).

Поисковый блок основывается на использовании базы спектроскопических данных [18], метеомоделей [19], априорной информации о коэффициентах аэрозольного ослабления, обратного рассеяния [20] и молекулярного рассеяния [21].

Расчётная часть алгоритма необходима для решения следующих задач:

- расчёт коэффициентов поглощения и спектров пропускания атмосферы методом «line-by-line»;
- моделирование лазерного зондирования с применением статистических моделей распределения атмосферных характеристик;
- моделирование систематических и случайных погрешностей восстановления газовых профилей;
- выработка требований к параметрам лидара.

Результаты моделирования и поиска информационных пар длин волн для МДП и диапазонов длин волн для МДП-ДОАС методик формируются в табличной и графической формах.

Методика применима для реализации систем как с традиционным функционалом МДП и ДОАС подходов по отдельности, так и для перспективного объединённого МДП-ДОАС подхода с применением одной и той же аппаратуры.

#### Лазерная система с ПГС для дистанционного зондирования атмосферы

В работе рассматривается лазерная система, входящая в состав лидара дифференциального поглощения и обеспечивающая перестраиваемую генерацию наносекундных импульсов излучения в спектральном диапазоне 3–4 мкм.

Лазерная система включает:

- Nd: YAG импульсный лазер LQ529B;
- преобразователь излучения с перестройкой длины волны 3–4 мкм;
- управление длиной волны от шаговых двигателей (ШД);
- контроллер для управления ШД;
- спектрометр S100;
- общее основание для лазера и преобразователя с системой заводки излучения накачки в преобразователь.

В табл. 1 и 2 представлены основные характеристики лазера накачки и преобразователя излучения.

**Таблица 1.** Спецификация лазера накачки LQ529B

**Table 1.** Specification of LQ529B pumping laser

Частота следования импульсов Pulse frequency	10 Гц (Hz)
Выходная энергия: на 1064 нм Output energy: at 1064 nm	350 мДж (mJ)
Длительность импульса на 1064 нм, FWHM Pulse length at 1064 nm, FWHM	10–13 нс (ns)
Диаметр луча на 1064 нм Beam diameter at 1064 nm	≤6 мм (mm)
Расходимость на 1064 нм Divergence angle at 1064 nm	~1,5 мрад (mrad)
Стабильность энергии импульсов на 1064 нм Stability of pulse energy at 1064 nm	±2,5 %

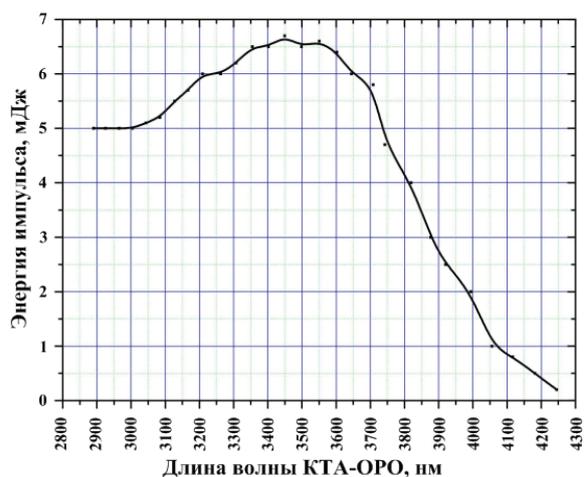
**Таблица 2.** Спецификация преобразователя

**Table 2.** Specification of radiation converter

Диапазон перестройки длины волны Wavelength tuning range	3–4 мкм ( $\mu\text{m}$ )
Ширина линии излучения Radiation line width	1–5 $\text{cm}^{-1}$ ( $\text{cm}^{-1}$ )
Энергия в импульсе, в максимуме перестроечной кривой Pulse energy, in the tuning curve peak	>6 мДж (mJ)
Частота следования импульсов Pulse frequency	10 Гц (Hz)
Расходимость излучения Radiation divergence angle	≤2 мрад (mrad)
Управление перестройкой длины волны Wavelength tuning control	от 3 ШД (step motor)

На рис. 2 представлена перестроечная кривая параметрического генератора света на кристалле  $\text{KTiOAsO}_4$  (КТА). Видно, что в диапазоне длин волн 3–4 мкм ПГС на кристалле КТА имеет довольно высокую энергию в импульсе на выходе системы (в максимуме перестроечной кривой её значения достигают величины > 6 мДж).

Разработанная МДП–ДОАС методика измерений МГС была апробирована для оценки уровня лидарных сигналов с использованием характеристик описанной выше лазерной системы с ПГС на основе нелинейного кристалла КТА. На основе характеристик лазера проведена оценка возможностей зондирования некоторых газовых примесей атмосферы на приземных трассах в исследуемой области спектра.



**Рис. 2.** Перестроечная кривая ПГС на кристалле КТА в спектральном диапазоне 3–4 мкм

**Fig. 2.** Tuning curve of the KTA crystal-based optical parametric oscillator (OPO) in spectral range 3–4  $\mu\text{m}$

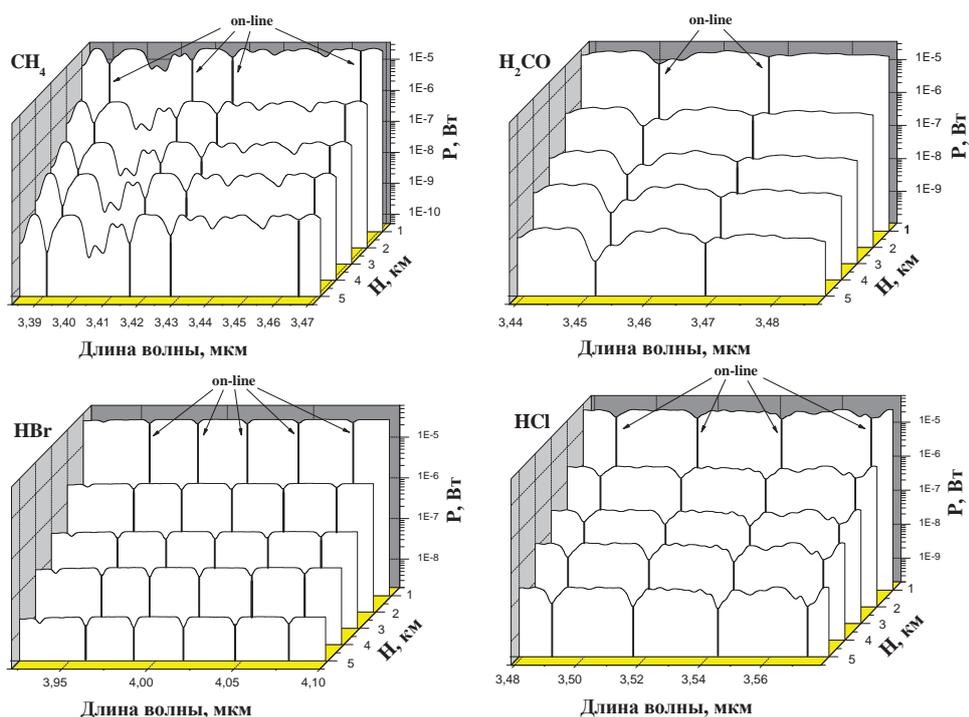
### Результаты моделирования лидарных измерений МГС атмосферы в диапазоне 3–4 мкм

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 [19]. Учитывалось мешающее поглощение всех основных атмосферных газовых компонент. Входные данные для проведения численного моделирования представлены в табл. 3.

**Таблица 3.** Входные данные для проведения численного моделирования лазерного зондирования

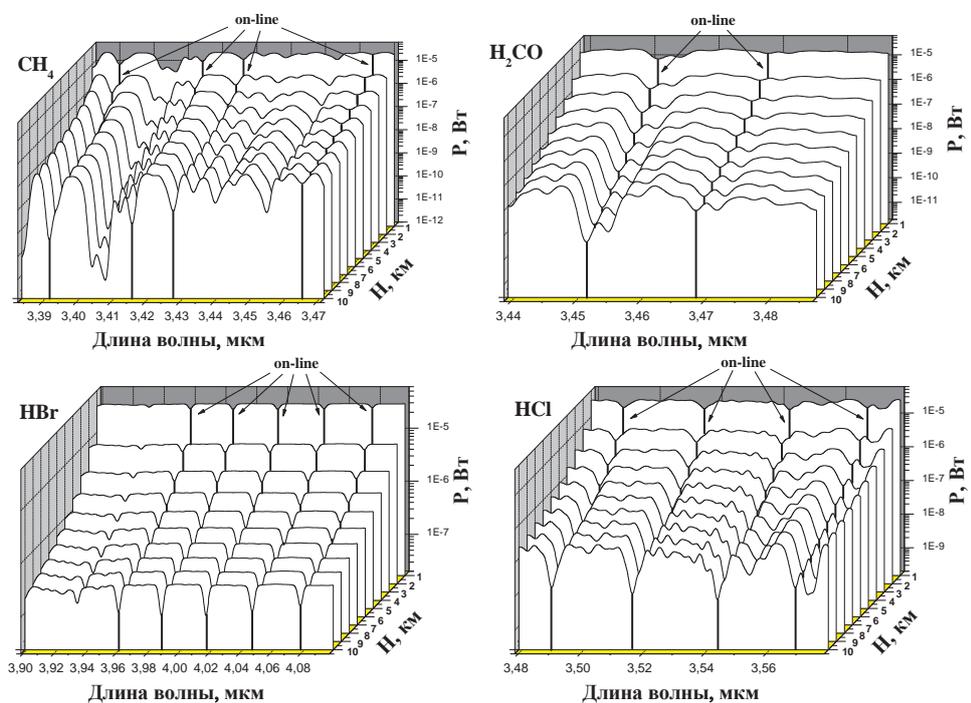
**Table 3.** Input data for numerical simulation of laser sounding

Параметр лидарной системы Lidar system parameters	Значение параметра Parameter value
Площадь приемника $A_{\text{приемн.}}$ ( $D=0,3$ м) Receiver area $A_{\text{rec.}}$ ( $D=0,3$ m)	$7 \cdot 10^{-8} \text{ км}^2$ ( $\text{km}^2$ )
Ширина аппаратной функции Instrumental function width	$2 \text{ см}^{-1}$ ( $\text{cm}^{-1}$ )
Эффективность приемной системы Receiving system efficiency	0,3
Пространственное разрешение $\Delta R$ Spatial resolution $\Delta R$	1 км (km)
Максимальная энергия в импульсе Pulse energy maximum	5 мДж (mJ)
Частота следования импульсов Pulse frequency	10 Гц (Hz)
Длительность импульса Pulse length	10 нс (ns)
Расходимость излучения Radiation divergence	2 мрад (mrad)
Диапазон перестройки лазера Tuning range of the laser	3–4 мкм ( $\mu\text{m}$ )
NEP фотодетектора Photodetector NEP	$1 \cdot 10^{-12}$ Вт (W)



**Рис. 3.** Пространственно и спектрально разрешенные лидарные сигналы вертикального зондирования метана, формальдегида, бромоводорода и хлороводорода в области работы ПГС на основе кристалла КТА (ширина аппаратной функции  $2\text{ см}^{-1}$ )

**Fig. 3.** Spatially and spectrally resolved lidar signals of methane, formaldehyde, hydrogen bromide and hydrogen chloride vertical sounding in the region of KTA-based OPO operation (instrumental function width is  $2\text{ cm}^{-1}$ )



**Рис. 4.** Пространственно и спектрально разрешенные лидарные сигналы горизонтального зондирования метана, формальдегида, бромоводорода и хлороводорода в области работы ПГС на основе кристалла КТА (ширина аппаратной функции  $2\text{ см}^{-1}$ )

**Fig. 4.** Spatially and spectrally resolved lidar signals of methane, formaldehyde, hydrogen bromide and hydrogen chloride horizontal sounding in the region of KTA-based OPO operation (instrumental function width is  $2\text{ cm}^{-1}$ )

В табл. 4 приведены информативные длины волн, пригодные для зондирования исследуемых в работе малых газовых составляющих атмосферы методом МДП–ДОАС.

**Таблица 4.** Длины волн, пригодные для зондирования метана, формальдегида, бромоводорода и хлороводорода

**Table 4.** Informative wavelengths chosen for sounding methane, formaldehyde, hydrogen bromide and hydrogen chloride

Газ Gas	$\lambda_{\text{погл.}}$ , мкм (в воздухе) $\lambda_{\text{absorption}}$ , $\mu\text{m}$ (in the air)	$\nu_{\text{погл.}}$ , $\text{см}^{-1}$ (в воздухе) $\nu_{\text{absorption}}$ , $\text{cm}^{-1}$ (in the air)	$T_{\text{газа}}$ $T_{\text{gas}}$	$T_{\text{меш. погл.}}$ $T_{\text{int. absorption}}$
CH <sub>4</sub>	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 <sub>2</sub> CO	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
	4,01634 – on-line	2489,829	0,79	0,99
	4,01279 – off-line	2492,031	0,99	0,99
HCl	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
	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
HCl	3,54318 – on-line	2821,829	0,52	0,85
	3,54770 – off-line	2818,727	0,96	0,96
	3,57191 – on-line	2799,622	0,60	0,93
	3,57690 – off-line	2795,716	0,97	0,97

На рис. 3 и 4 приведены рассчитанные для вертикальной (рис. 3) и горизонтальной (рис. 4) тропосферной трассы пространственно и спектрально разрешенные лидарные сигналы для CH<sub>4</sub> (а), H<sub>2</sub>CO (б),

HBr (в) и HCl (г) в области информативных длин волн МГС атмосферы, представленных в табл. 4.

На рисунках 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  $NEP=10^{-12}$  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 перспективность 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 рассматриваемых в работе МГС атмосферы на приземных тропосферных трассах. Причем конструкция лазерной системы предусматривает возможность сужения линии лазерного излучения в пределах 0,01–0,05 см<sup>-1</sup>. 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 рассматриваемый лазерный источник уникальным прибором для создания лидара дифференциального поглощения наземного базирования.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (Соглашение № 14–27–00022 в части разработки методики планирования и проведения лидарных МДП–ДОАС измерений) и Российского фонда фундаментальных исследований (Грант № 16–45–700722 в части проведения численного моделирования лидарных измерений МГС атмосферы).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев Б.И., Маннун У.М. ИК-лидары дифференциального поглощения для экологического мониторинга окружающей среды // Квантовая электроника. – 2006. – Т. 36. – № 9. – С. 801–820.
2. Mid-IR DIAL for high-resolution mapping of explosive precursors / V. Mitev, S. Babichenko, J. Bennes, R. Borelli, A. Dolfi-Bouteyre, L. Fiorani, L. Hespel, T. Huet, A. Palucci, M. Pistilli, A. Puiui, O. Rebane, I. Sobolev // SPIE Remote Sensing. International Society for Optics and Photonics. – 2013. – V. 8894. – P. 88940S–88940S-13.
3. Sunesson J.A., Apituley A., Swart D.P.J. Differential absorption lidar system for routine monitoring of tropospheric ozone // Applied Optics. – 1994. – V. 33. – № 30. – P. 7045–7058.
4. Browell E.V. Differential absorption lidar sensing of ozone // Proceeding of the IEEE. – 1989. – V. 77. – № 3. – P. 419–432.
5. Differential absorption lidar sensing of ozone / T.J. McGee, M. Gross, U.N. Singh, J.J. Butler, P.E. Kimvilakani // Optical Engineering. – 1995. – V. 34. – № 5. – P. 1421–1430.
6. Лидарное зондирование озона в верхней тропосфере – нижней стратосфере: методика и результаты измерений / В.Д. Бураков, С.И. Долгий, А.А. Невзоров, А.В. Невзоров, О.А. Рома-

- новский, О.В. Харченко // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – № 9. – С. 124–132.
7. Airborne differential absorption lidar system for measurements of atmospheric water vapor and aerosols / N.S. Higdon, E.V. Browell, P. Ponsardin, B.E. Grossmann, C.F. Butler, T.H. Chyba, M. Neale Mayo, R.J. Allen, A.W. Neuser, W.B. Grant, S. Ismail, S.D. Mayor, A.F. Carter // *Applied Optics*. – 1994. – V. 33. – № 27. – P. 6422–6438.
  8. Toriumi R., Tai H., Takechi N. Tunable solid-state blue laser differential absorption lidar system for NO<sub>2</sub> monitoring // *Optical Engineering*. – 1996. – V. 35. – № 8. – P. 2371–2375.
  9. Харченко О.В. Методика планирования и проведения лидарных измерений профилей метеорологических параметров атмосферы // *Оптика атмосферы и океана*. 2012. – Т. 25. – № 06. – С. 523–528.
  10. Результаты моделирования лидарных измерений профилей метеопараметров с помощью оберточного СО-лазера / Г.Г. Матвиенко, О.А. Романовский, О.В. Харченко, С.В. Яковлев // *Оптика атмосферы и океана*. – 2014. – Т. 27. – № 02. – С. 123–125.
  11. Романовский О.А., Харченко О.В., Яковлев С.В. Применение многоволновых ИК-лазеров для лидарных и трассовых измерений метеорологических параметров атмосферы // *Известия вузов. Физика*. – 2014. – Т. 57. – № 10. – С. 74–80.
  12. Лидарный спектроскопический газоанализ атмосферы / С.М. Бобровников, Г.Г. Матвиенко, О.А. Романовский, И.Б. Сериков, А.Я. Суханов. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2014. – 510 с.
  13. Platt U., Perner D., Patz H.W. Simultaneous measurement of atmospheric CH<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub>, and NO<sub>2</sub> by differential optical absorption // *J. Geophys. Res.* – 1979. – V. 84. – Iss. C10. – P. 6329–6335.
  14. Platt U. Air monitoring by spectroscopic techniques // *Chemical Analysis Series*. – 1994. – V. 127. – P. 27–84.
  15. Platt U., Stutz J. *Differential optical absorption spectroscopy*. – New-York, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. – 593 p.
  16. Fourier-transform lidar / M. Douard, R. Bacis, P. Rambaldi, A. Ross, J.-P. Wolf, G. Fabre, R. Stringat // *Optics Letters*. – 1995. – V. 20. – № 20. – P. 2140–2143.
  17. Коллис Р.Т.Х., Рассел П.Б. Лидарные измерения аэрозольных частиц и газов посредством упругого рассеяния назад и дифференциальное поглощение // *Лазерный контроль атмосферы / под ред. Е.Д. Хинкли*. – М.: Мир, 1979. – С. 91–180.
  18. The HITRAN2012 molecular spectroscopic database / L.S. Rothman, I.E. Gordon, Y. Babikov, A. Barbe, Benner Ch.D., P.F. Bernath, M. Birk, L. Bizzocchi, V. Boudon, L.R. Brown, A. Campargue, K. Chance, E.A. Cohen, L.H. Coudert, V.M. Devi, B.J. Drouin, A. Fayt, J.-M. Flaud, R.R. Gamache, J.J. Harrison, J.-M. Hartmann, C. Hill, J.T. Hodges, D. Jacquemart, A. Jolly, J. Lamouroux, R.J. Le Roy, G. Li, D.A. Long, O.M. Lyulin, C.J. Mackie, S.T. Massie, S. Mikhailenko, H.S.P. Müller, O.V. Naumenko, A.V. Nikitin, J. Orphal, V. Perevalov, A. Perrin, E.R. Polovtseva, C. Richard, M.A.H. Smith, E. Starikova, K. Sung, S. Tashkun, J. Tennyson, G.C. Toon, V.I. Tyuterev, G. Wagner // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. – 2013. – V. 130. – P. 4–50.
  19. Зуев В.Е., Комаров В.С. Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы. – Л.: Гидрометеоздат, 1986. – 264 с.
  20. Креков Г.М., Рахимов Р.Ф. Оптико-локационная модель континентального аэрозоля. – Новосибирск: Наука, 1982. – 199 с.
  21. *Optical properties of atmosphere*. Report AFCRL-71-0297 / R.A. McClatchey, R.W. Fenn, J.E.A. Selby, F.E. Volz, J.S. Garing. – Bedford: Mass, 1971. – 86 p.

Поступила 10.06.2016 г.

#### Информация об авторах

**Романовский О.А.**, доктор физико-математических наук, заведующий научно-образовательным центром Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук; профессор кафедры управления инновациями факультета инновационных технологий Национального исследовательского Томского государственного университета.

**Садовников С.А.**, младший научный сотрудник научно-образовательного центра Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук.

**Суханов А.Я.**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории лидарных методов Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук; доцент кафедры автоматизированных систем управления Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.

**Харченко О.В.**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник центра лазерного зондирования атмосферы Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук.

**Яковлев С.В.**, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории лидарных методов Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук; доцент кафедры управления инновациями факультета инновационных технологий Национального исследовательского Томского государственного университета.

UDC 551.510.532; 551.501.816

## APPLICATION OF OPTICAL PARAMETRIC OSCILLATOR FOR REMOTE MONITORING OF ATMOSPHERE IN THE 3–4 $\mu\text{m}$ SPECTRAL RANGE

Oleg A. Romanovskii<sup>1,2</sup>,

roa@iao.ru

Sergey A. Sadovnikov<sup>1</sup>,

sadsa@iao.ru

Alexander Ya. Sukhanov<sup>1,3</sup>,

say@iao.ru

Olga V. Kharchenko<sup>1</sup>,

olya@iao.ru

Semyon V. Yakovlev<sup>1,2</sup>,

ysv@iao.ru

<sup>1</sup> V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS,  
1, Academician Zuev square, Tomsk, 634021, Russia.

<sup>2</sup> National Research Tomsk State University,  
36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

<sup>3</sup> Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,  
40, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

*Relevance of the research is caused by the need of developing the atmosphere remote sensing methods and systems for real-time monitoring of the environment.*

**The main aim** of the study is to develop the methodology of planning and carrying out laser remote sensing of atmospheric trace gases through the approach combining the advantages of differential absorption lidar (DIAL) and the differential optical absorption spectroscopy (DOAS), search for informative wavelengths in the middle infrared range, numerical simulation of lidar sensing of atmospheric trace gases at the selected wavelengths.

**The methods used in the study:** differential absorption lidar, differential optical absorption spectroscopy.

**The results.** The authors have studied the opportunities of applying laser system with parametric light generation based on a nonlinear crystal  $\text{KTiOAsO}_4$  for atmosphere lidar sensing in the spectral range of 3–4  $\mu\text{m}$ . The technique of lidar measurements of atmospheric gaseous components by the differential absorption lidar and differential optical absorption spectroscopy was developed. The authors tested the developed method to assess the feasibility of lidar sensing of atmospheric trace gases. The paper introduces the results of atmospheric lidar measurements modeling in the range of 3–4  $\mu\text{m}$ , which demonstrate the possibility of lidar signal restoring on vertical paths up to 5 km and on horizontal paths up to 10 km when probing methane, formaldehyde, hydrogen bromide and hydrogen chloride using laser beam with a width of the instrumental function of 2  $\text{cm}^{-1}$ .

**Conclusion.** Laser with parametric light generation based on nonlinear  $\text{KTiOAsO}_4$  crystal with the operating range of 3–4  $\mu\text{m}$  is the advanced light source for remote sensing the atmospheric trace gases, considered in the work, by the DIAL–DOAS technique at the ground level tropospheric paths.

### Key words:

Atmosphere, lidar sounding, DIAL, DOAS, atmospheric trace gas, nonlinear crystals.

*The research was supported by the Russian Science Foundation (Agreement no. 14–27–00022 as related to the development of the planning technique and DIAL–DOAS lidar measurement) and the Russian Foundation of Fundamental Research (Grant no. 16–45–700722 as related to numerical simulation of lidar measurements of atmosphere trace gas).*

### REFERENCES

1. Vasilev B.I., Mannun O.M. IK lidary differentsialnogo poglashcheniya dlya ekologicheskogo monitoring okruzhayushchey sredy [IR differential-absorption lidars for ecological monitoring of the environment]. *Quantum Electronics*, 2006, vol. 36, no. 9, pp. 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. *SPIE Remote Sensing. International Society for Optics and Photonics*, 2013, vol. 8894, pp. 88940S–88940S-13.
3. Sunesson J.A., Apituley A., Swart D.P.J. Differential absorption lidar system for routine monitoring of tropospheric ozone. *Applied Optics*, 1994, vol. 33, no. 30, pp. 7045–7058.
4. Browell E.V. Differential absorption lidar sensing of ozone. *Proceeding of the IEEE*, 1989, vol. 77, no. 3, pp. 419–432.
5. McGee T.J., Gross M., Singh U.N., Butler J.J., Kimvilakani P.E. Differential absorption lidar sensing of ozone. *Optical Engineering*, 1995, vol. 34, no. 5, pp. 1421–1430.

6. Burlakov V.D., Dolgii S.I., Nevzorov A.A., Nevzorov A.V., Romanovskii O.A., Kharchenko O.V. Lidar sensing of ozone in the upper troposphere – lower stratosphere: technique and results of measurements. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 325, no. 2, pp. 127–136. In Rus.
7. Higdon N.S., Browell E.V., Ponsardin P., Grossmann B.E., Butler C.F., Chyba T.H., Neale 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. *Applied Optics*, 1994, vol. 33, no. 27, pp. 6422–6438.
8. Toriumi R., Tai H., Takechi N. Tunable solid-state blue laser differential absorption lidar system for NO<sub>2</sub> monitoring. *Optical Engineering*, 1996, vol. 35, no. 8, pp. 2371–2375.
9. Kharchenko O.V. The method for planning and carrying out the lidar measurements of profiles of atmospheric meteorological parameters. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2012, vol. 25, no. 06, pp. 523–528. In Rus.
10. Matvienko G.G., Romanovskii O.A., Kharchenko O.V., Yakovlev S.V. Simulation of lidar measurements of profiles of atmospheric meteorological parameters using overtone CO laser. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2014, vol. 27, no. 02, pp. 123–125. In Rus.
11. Romanovskii O.A., Kharchenko O.V., Yakovlev S.V. Application of multiwave IR laser for lidar and path measurements of the meteorological parameters of the atmosphere. *Russian Physics Journal*, 2015, vol. 57, no. 10, pp. 1380–1387. In Rus.
12. Bobrovnikov S.M., Matvienko G.G., Romanovskii O.A., Serikov I.B., Sukhanov A.Ya. *Lidarny spektroskopichesky gazoanaliz atmosfery* [Lidar spectroscopic gas analysis of the atmosphere]. Tomsk, IOA SO RAN Publ., 2014. 510 p.
13. Platt U., Perner D., Patz H. W. Simultaneous measurement of atmospheric CH<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub>, and NO<sub>2</sub> by differential optical absorption. *J. Geophys. Res.*, 1979, vol. 84, Iss. C10, pp. 6329–6335.
14. Platt U. Air monitoring by spectroscopic techniques. *Chemical Analysis Series*, 1994, vol. 127, pp. 27–84.
15. Platt U., Stutz J. Differential optical absorption spectroscopy. New-York, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2008. 593 p.
16. Douard M., Bacis R., Rambaldi P., Ross A., Wolf J.-P., Fabre G., Stringat R. Fourier-transform lidar. *Optics Letters*, 1995, vol. 20, no. 20, pp. 2140–2143.
17. Collis R.T.H., Russell P.B. Lidar measurement of particles and gases by elastic backscattering and differential absorption. *Laser monitoring of the atmosphere*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 1976. pp. 71–151.
18. Rothman L.S., Gordon I.E., Babikov Y., Barbe A., Chris Benner D., Bernath P.F., Birk M., Bizozochi L., Boudon V., Brown L.R., Campargue A., Chance K., Cohen E.A., Couderc 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.G., Wagner G. The HITRAN2012 molecular spectroscopic database. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2013, vol. 130, pp. 4–50.
19. Zuev V.E., Komarov V.S. *Statisticheskie modeli temperatury i gazovyykh komponent atmosfery* [Statistic models of temperature and gas components of the atmosphere]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1986. 264 p.
20. Krekov G.M., Rakhimov R.F. *Optiko-lokatsionnaya model kontinentalnogo aerolya* [Optical location model of continental aerosol]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1982. 199 p.
21. McClatchey R.A., Fenn R.W., Selby J.E.A., Volz F.E., Garing J.S. *Optical properties of atmosphere. Report AFCRL-71-0297*. Bedford, Mass, 1971. 86 p.

Received: 10 May 2016.

#### Information about the authors

**Oleg A. Romanovskii**, Dr. Sc., head of the center, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS; professor, National Research Tomsk State University.

**Sergey A. Sadovnikov**, junior researcher, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS.

**Alexander Ya. Sukhanov**, Cand. Sc., senior researcher, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS; associate professor, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics.

**Olga V. Kharchenko**, Cand. Sc., senior researcher, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS.

**Semyon V. Yakovlev**, Cand. Sc., researcher, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS; associate professor, National Research Tomsk State University.