

УДК 551.510.532; 551.501.816

ЛИДАРНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ МАЛЫХ ГАЗОВЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ АТМОСФЕРЫ МЕТОДОМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ: РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Бочковский Дмитрий Андреевич,

мл. науч. сотр. лаборатории лидарных методов ФГБНУ «Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук», Россия, 634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1. E-mail: moto@iao.ru

Романовский Олег Анатольевич,

д-р физ.-мат. наук, зав. научно-образовательным центром ФГБНУ «Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук», Россия, 634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1; профессор каф. управления инновациями факультета инновационных технологий ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 36. E-mail: roa@iao.ru

Харченко Ольга Викторовна,

ст. науч. сотр. Центра лазерного зондирования атмосферы ФГБНУ «Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук», Россия, 634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1. E-mail: olya@iao.ru

Яковлев Семен Владимирович,

канд. физ.-мат. наук, науч. сотр. лаборатории лидарных методов ФГБНУ «Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук», Россия, 634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1; доцент каф. управления инновациями факультета инновационных технологий ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 36. E-mail: ysv@iao.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью развития лазерных методов зондирования для решения проблемы контроля состояния окружающей среды.

Цель работы: создание программно-алгоритмической системы для лазерного дистанционного зондирования малых газовых составляющих атмосферы методом дифференциального поглощения, поиск информативных длин волн, численное моделирование лидарного зондирования газовых примесей и экспериментальная проверка информативности выбранных длин волн для зондирования малых газовых составляющих атмосферы.

Методы исследования: метод дифференциального поглощения, основанный на эффекте резонансного поглощения лазерного излучения в пределах селективной линии поглощения исследуемой газовой компоненты.

Результаты: Разработанная программно-аналитическая система «LIDAS» позволяет определить информативные длины волн лазерного зондирования различных малых газовых составляющих атмосферы, с ее помощью можно проводить численное моделирование лидарного зондирования малых газовых составляющих атмосферы, оценивать систематические ошибки восстановления профилей атмосферных газов, вырабатывать требования к лидарам дифференциального поглощения, а также планировать и проводить эксперименты по лидарным измерениям профилей малых газовых составляющих атмосферы. Проведенное с помощью системы «LIDAS» численное моделирование показало, что при использовании лидара на основе обертонового СО-лазера в диапазоне высот 0–5 км при диаметре приемной оптики 0,3 м и пространственном разрешении 1 км уровень лидарных эхо-сигналов для всех исследуемых газов превышает уровень эквивалентной мощности шума фотоприемника $NEP=10^{-9}$ Вт. Эксперименты по лазерной диагностике газового состава атмосферы обертонным СО-лазером подтвердили результат предварительной оценки эффективности применения метода дифференциального поглощения с учетом требований к спектрально-энергетическим параметрам зондирующего комплекса, рассчитанных разработанной программно-алгоритмической системой «LIDAS».

Ключевые слова:

Лидар, газоанализ, атмосфера, дифференциальное поглощение.

Малые газовые составляющие атмосферы (МГС), к числу которых относятся водяной пар, углекислый газ, озон, окислы азота и серы, угар-

ный газ и целый ряд других, являются оптически активными компонентами атмосферы и оказывают существенное воздействие на протекание таких

процессов, как погодообразование, загрязнение воздушного бассейна промышленными выбросами, трансформация солнечного излучения, распространение оптических волн. В связи с этим возникает проблема разработки соответствующих приборов и методов анализа газового состава атмосферы, при этом наиболее интенсивно в последнее время развиваются дистанционные методы [1–3], которые, в отличие от стандартных контактных методов газоанализа, обеспечивают возможность получения данных с высокой оперативностью и в значительных пространственных масштабах.

Указанным требованиям в наибольшей степени удовлетворяют лазерные методы исследования газового состава атмосферы, основанные на использовании таких спектроскопических эффектов взаимодействия лазерного излучения с атмосферой, как резонансное поглощение, комбинационное рассеяние и флуоресценция. Максимальным сечением взаимодействия из перечисленных явлений обладает резонансное поглощение лазерного излучения атмосферными газами, что и определяет высокую чувствительность метода дифференциального поглощения (МДП), использующего это явление.

В настоящее время лазерное зондирование МГС по МДП принципиально реализовано [4, 5], однако из-за технической сложности лидаров измерения проводились только периодически. В связи с этим ставится задача повышения эффективности и информативности каждого измерения, решение которой возможно путем численного моделирования для оценки потенциальных возможностей и реализации оптимальных схем построения создаваемых лидарных систем [6–10].

В данной работе с помощью численного моделирования и экспериментально решаются следующие задачи:

- разработка программно-алгоритмической системы для лазерного дистанционного зондирования МГС по МДП;
- поиск информативных длин волн и численное моделирование лидарного зондирования газовых примесей по МДП;
- экспериментальная проверка информативности выбранных длин волн для зондирования МГС атмосферы.

Интенсивное развитие лазерных спектроскопических методов зондирования для решения проблемы контроля состояния окружающей среды требует предварительного численного моделирования для оценки потенциальных возможностей и реализации оптимальных схем построения создаваемых лидарных систем. Для решения этих задач создана информационно-вычислительная система для лазерного зондирования МГС атмосферы по МДП (LIdar Differential Absorption Sensing «LIDAS»). В отличие от системы «LIDAS», разработанные ранее пакеты программ для моделирования лазерного зондирования атмосферных газов методом дифференциального поглощения [11, 12]

предназначены только для анализа потенциальных возможностей лидарного зондирования водяного пара и озона в области генерации CO_2 -лазера и не дают возможности анализа применимости для многокомпонентного газоанализа других лазерных источников.

Лазерное зондирование профилей концентраций малых газовых составляющих атмосферы с использованием МДП основано на эффекте резонансного поглощения лазерного излучения в пределах селективной линии поглощения исследуемой газовой компоненты. Концентрация газовой составляющей $n(z)$, усредненная по пространственному интервалу Δz , определяется в этом случае по известной формуле [13]:

$$n(z) = \frac{1}{2(K(v_1, z) - K(v_2, z)) \Delta z} \times \ln \left[\frac{P(v_1, z)P(v_2, z + \Delta z)}{P(v_2, z)P(v_1, z + \Delta z)} \right], \quad (1)$$

где $K(v_1, z)$ и $K(v_2, z)$ – значения коэффициентов поглощения вдоль трассы зондирования в точке z на частотах, расположенных внутри v_1 и вне v_2 контура селективной линии поглощения исследуемой газовой компоненты, предварительно рассчитываемые с использованием высотных модельных профилей метеопараметров атмосферы; $P(v_1, z)$, $P(v_2, z)$, $P(v_1, z + \Delta z)$ и $P(v_2, z + \Delta z)$ – значения лазерных эхосигналов на частотах зондирования v_1 и v_2 из точек z и $z + \Delta z$ по трассе зондирования, регистрируемые приемной системой лидара. Лидарные сигналы описываются с помощью известного уравнения лазерной локации, которое в приближении однократного рассеяния можно представить в виде [1]:

$$P(v, z) = \chi \eta P(v, z_0) \frac{c\tau}{2} A z^{-2} (\beta_m(v, z) + \beta_a(v, z)) \exp \left[-2 \int_0^z \alpha(v, z) dz \right], \quad (2)$$

где χ – пропускание приемной оптики лидара; η – эффективность фотоприемника; $P(v, z_0)$ – мощность лазерного излучения, посылаемая из места расположения лидара z_0 ; c – скорость света; τ – длительность импульса лазерного излучения; A – эффективная площадь приемной оптической системы; $\beta_m(v, z)$ и $\beta_a(v, z)$ – объемные коэффициенты молекулярного и аэрозольного рассеяния лазерного излучения в направлении назад; $\alpha(v, z)$ – профиль коэффициента ослабления лазерного излучения, который можно представить в виде суммы коэффициентов ослабления, обусловленных поглощением и рассеянием аэрозолями и молекулами атмосферных газов:

$$\alpha(v, z) = \alpha_{ma}(v, z) + \alpha_{ms}(v, z) + \alpha_{aa}(v, z) + \alpha_{as}(v, z), \quad (3)$$

где $\alpha_{ms}(v, z)$ – профиль объемного коэффициента ослабления лазерного излучения за счет молекулярного рассеяния; $\alpha_{aa}(v, z)$ и $\alpha_{as}(v, z)$ – профили коэффициентов ослабления, обусловленного поглощением и рассеянием атмосферными аэрозолями, со-

ответственно; $\alpha_{ma}(v, z)$ – профиль объемного коэффициента ослабления лазерного излучения за счет молекулярного поглощения, который можно описать как

$$\alpha_{ma}(v, z) = n(z) \cdot K(v, z), \quad (4)$$

где $K(v, z)$ – профиль коэффициента поглощения зондирующего лазерного излучения молекулами исследуемого газа, который можно представить в следующем виде:

$$K(v, z) = K_0(z) \cdot \varphi_v(b, \omega), \quad (5)$$

$$K_0(z) = \frac{S(z)}{\gamma_D(z)} \left[\frac{\ln 2}{\pi} \right]^{0.5}, \quad (6)$$

где $S(z)$ и $\gamma_D(z)$ – интенсивность и доплеровская полуширина линии поглощения в точке z ; $\varphi_v(b, \omega)$ – форма спектрального контура линии поглощения, которая в общем случае для любых атмосферных высот может быть описана с использованием фойгтовского контура:

$$\varphi_v(z) = \frac{b}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(-x^2)}{b^2 + (\omega - x)^2} dx, \quad (7)$$

$$b = \frac{\gamma_L(z)}{\gamma_D(z)} (\ln 2)^{0.5}, \quad \omega = \frac{(v - v_0)}{\gamma_D(z)} (\ln 2)^{0.5}, \quad (8)$$

где $\gamma_L(z)$ – лоренцевская полуширина линии поглощения вдоль трассы зондирования; v_0 – центр линии поглощения исследуемого газа.

Спектральные параметры $S(z)$, $\gamma_L(z)$ и $\gamma_D(z)$ зависят от температуры T и давления P атмосферы следующим образом:

$$S(z) = \left[\frac{T_0}{T(z)} \right]^n \exp \left\{ \frac{hc}{k} E'' \left[\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T(z)} \right] \right\}, \quad (9)$$

$$\gamma_L(z) = \gamma_0 \frac{P(z)}{P_0} \left[\frac{T_0}{T(z)} \right]^q, \\ \gamma_D(z) = \frac{v_0}{c} \left[\frac{2kT(z) \ln 2}{m} \right]^{0.5}, \quad (10)$$

где S_0 и γ_0 – интенсивность и лоренцевская полуширина при температуре T_0 и давлении P_0 ; h – постоянная Планка; k – постоянная Больцмана; m – масса молекулы атмосферного газа; q – параметр, равный 1 для линейных молекул и 1,5 – для нелинейных молекул; E'' – энергия нижнего состояния поглощающего перехода. Показатель степени q в формуле (10) согласно газокINETической теории Лоренца равен 1/2. Экспериментальные измерения для линий поглощения различных газов дают значения от $q=0,24$ до $q=0,88$.

Выражения (5)–(10) записаны в приближении монохроматичности лазерного излучения, то есть ширина линии лазерного излучения равна нулю. На практике источники лазерного излучения обладают конечной спектральной шириной лазерного излучения. В этом случае высотные профили коэффициентов поглощения могут быть представлены в следующем виде:

$$K_{eff}(v_1, z) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} I(v_1, v) T_{ma}^2(v, z) K(v, z) dv}{\int_{-\infty}^{\infty} I(v_1, v) T_{ma}^2(v, z) dv}, \quad (11)$$

где $K(v, z)$ – профили монохроматических коэффициентов поглощения; $I(v_1, v)$ – спектральное распределение мощности зондирующего импульса лазерного излучения; $T_{ma}^2(v, z)$ – квадрат пропускания, описываемый в случае учета молекулярного поглощения исследуемым газом как

$$T_{ma}^2(v, z) = \exp \left[-2 \int_0^z \alpha_{ma}(v, z) dz \right]. \quad (12)$$

Формулы (1)–(12) заложены в основу алгоритма планирования и проведения лидарных измерений профилей МГС атмосферы, представленного на рис. 1.

Алгоритм можно разделить на три составляющие: поисковую, расчетную, а также блок обработки лидарных сигналов. Входными данными являются исследуемый атмосферный газ, пространственное разрешение лидарных измерений, тип трассы зондирования (горизонтальная, вертикальная или наклонная), ширина линии лазерного излучения и другие параметры при необходимости решения конкретной задачи.

Для уверенного определения концентраций газов в атмосфере по МДП необходимо, чтобы используемые для зондирования линии поглощения удовлетворяли следующим требованиям:

- линии или набор рядом расположенных линий поглощения должны иметь интенсивность, достаточную для использования их в лазерном газоанализе по МДП;
- мешающее поглощение другими газами (кроме исследуемого) должно быть мало или хотя бы сравнимо с поглощением зондируемым газом;
- рядом с выбранной линией поглощения должно присутствовать окно прозрачности, в котором поглощение исследуемым газом пренебрежимо мало;
- необходимо, чтобы как линии поглощения, так и окно прозрачности с хорошей точностью совпадали с удобной с технической точки зрения частотой (длиной волны) лазерного излучения.

Указанные критерии легли в основу разработки программного модуля, используемого при поиске информативных для зондирования по МДП линий поглощения газовых компонент атмосферы.

В поисковом блоке самым большим по объему используемой памяти является атлас линий поглощения атмосферных газов [14]. Метеомодели взяты из [15, 16], используется также информация об аэрозольном ослаблении, коэффициенте обратного рассеяния и молекулярном рассеянии [17].

Расчетный блок позволяет решать следующие взаимосвязанные задачи:

- расчет коэффициентов поглощения и спектров пропускания атмосферы;



Рис. 1. Схема алгоритма планирования и проведения лидарных измерений профилей МГС атмосферы

Fig. 1. Diagram of algorithm of planning and lidar measuring of atmosphere gas component profiles

- численное моделирование зондирования профилей МГС атмосферы;
- расчет систематических ошибок восстановления профилей атмосферных газов;
- расчет случайных ошибок восстановления профилей МГС атмосферы;
- выработка требований к параметрам лидара.

С учетом результатов численного моделирования и оценки погрешностей измерений производится выработка требований к метеорологическому лидару дифференциального поглощения (ширина линии лазерного излучения, частота повторения импульсов, точность измерения длины волны и др.). Используя данный алгоритм, можно найти длины волн, которые являются наиболее информативными с точки зрения лидарных измерений метеопараметров атмосферы методом дифференциального поглощения.

Описанный выше алгоритм реализован в программно-алгоритмической системе для лазерного дистанционного зондирования МГС по МДП. Интерфейс системы «LIDAS» представлен на рис. 2.

Таким образом, разработанная система «LIDAS» позволяет определить информативные, с

точки зрения газоанализа, длины волн лазерного зондирования различных МГС атмосферы, токсичных и взрывоопасных газов и сечения поглощения для частот излучения различных лазеров. С ее помощью можно проводить численное моделирование лидарного зондирования МГС атмосферы, оценивать систематические ошибки восстановления профилей атмосферных газов, вырабатывать требования к лидарам дифференциального поглощения, а также планировать и проводить эксперименты по лидарным измерениям профилей МГС атмосферы.

Система «LIDAS» была использована для поиска длин волн зондирования МГС атмосферы в наиболее информативной с точки зрения лазерного газоанализа средней ИК-области спектра. Рассматривались возможности использования в качестве источника лазерного излучения обертонового СО-лазера [18–20].

Результаты поиска информативных длин волн, пригодных для зондирования МГС атмосферы с помощью обертонового СО-лазера, представлены в табл. 1, в которой указаны центры линий поглощения атмосферных газов $\nu_{\text{погл}}$ и ближайшие к ним

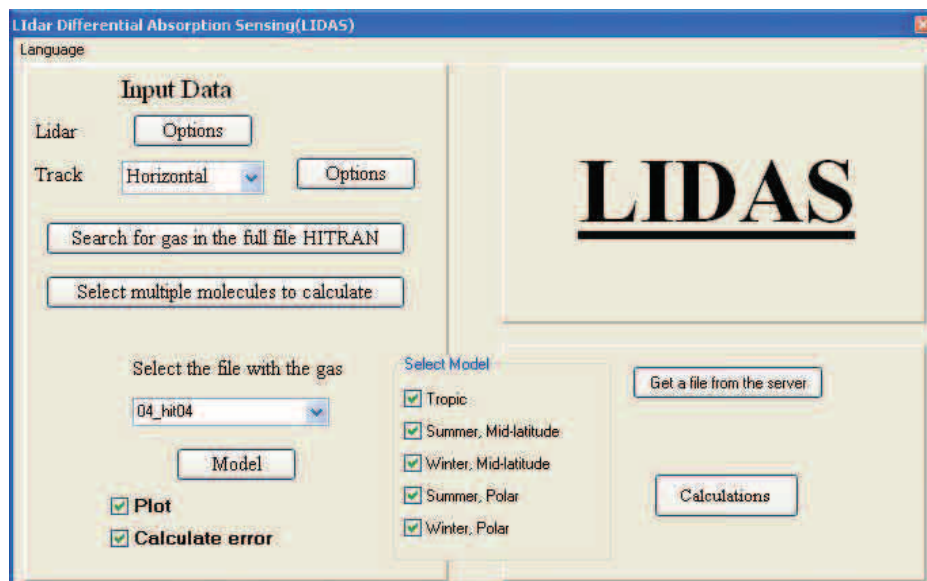


Рис. 2. Интерфейс программно-алгоритмической системы для лазерного дистанционного зондирования МГС по МДП системы «LIDAS»

Fig. 2. Interface of program algorithm system for laser remote sensing of gas components by the differential absorption method of the system «LIDAS»

центры линий излучения $\nu_{изл.}$, а также величина отстройки $\Delta\nu$ между центрами линий поглощения и излучения. В табл. 1 также представлены коэффициенты пропускания $T_{МГС}$ на приземной трассе 1 км при поглощении только исследуемым газом и коэффициент пропускания мешающих газов $T_{меш.погл.}$ который рассчитывался по линиям поглощения, расположенным на расстоянии не более 10 см^{-1} от центра лазерной линии.

Таблица 1. Информативные длины волн, наиболее пригодные для зондирования малых газовых составляющих атмосферы излучением обертонного СО-лазера

Table 1. Informative wave lengths suitable most of all for sensing atmosphere gas components by overtone CO-laser radiation

Газ/ Gas	$\lambda_{изл.},$ мкм	$\nu_{изл.},\text{ см}^{-1}$	$\lambda_{погл.},$ мкм	$\nu_{погл.},\text{ см}^{-1}$	$\Delta\nu,$ см^{-1}	$T_{МГС}$	$T_{меш.погл.}$
CH ₄	3,44030	2906,723	3,44037	2906,664	0,059	0,80	0,93
N ₂ O	3,87790	2578,715	3,87789	2578,719	0,0042	0,70	0,96
H ₂ CO	3,56340	2806,309	3,56332	2806,371	0,062	0,60	0,98
NO ₂	3,42820	2916,983	3,42823	2916,956	0,027	0,70	0,80

Для оценки возможностей лидарного зондирования МГС атмосферы с помощью выбранных в результате проведенного поиска информативных длин волн в диапазоне генерации обертонного СО-лазера (табл. 1) был проведен расчет эхо-сигналов для вертикальной трассы. Учитывалось мешающее поглощение всех основных атмосферных газовых компонент, концентрация зондируемой газовой компоненты полагалась равной 1 млн^{-1} . Входные данные для проведения численного моделирования представлены в табл. 2.

На рис. 3 представлены рассчитанные для вертикальных трасс пространственно и спектрально разрешенные лидарные эхо-сигналы в области выбранных длин волн зондирования некоторых рассматриваемых в данной работе МГС атмосферы.

Таблица 2. Входные данные для проведения численного моделирования лидарного зондирования МГС атмосферы с помощью обертонного СО-лазера

Table 2. Output data for numerical simulation of lidar sensing of atmosphere gas components by overtone CO-laser

Параметр лидарной системы Lidar system parameter	Значение параметра Parameter value
Площадь приемника $A_{приемн.}$ ($D=0,3\text{ м}$) / Receiver area	700 см^2
Ширина аппаратной функции / Instrument function width	0,01 см^{-1}
Эффективность приемной системы / Receiving system efficiency	0,3
Пространственное разрешение ΔR / Space resolution	1 км
Пиковая мощность лазера / Laser peak output	20·10 ³ Вт
Диапазон перестройки лазера / Laser rearrangement range	2,5–4,2 мкм
Коэффициент обратного аэрозольного рассеяния β_z / Coefficient of reverse aerosol scattering	2,3·10 ⁻³ км^{-1}
NEP фотодетектора / NEP of photo detector	1·10 ⁻⁹ Вт

Из рис. 3 видно, что во всем рассматриваемом диапазоне высот 0–5 км уровень лидарных эхо-сигналов для всех исследуемых газов превышает уровень эквивалентной мощности шума фотоприемника $\text{NEP}=10^{-9}\text{ Вт}$.

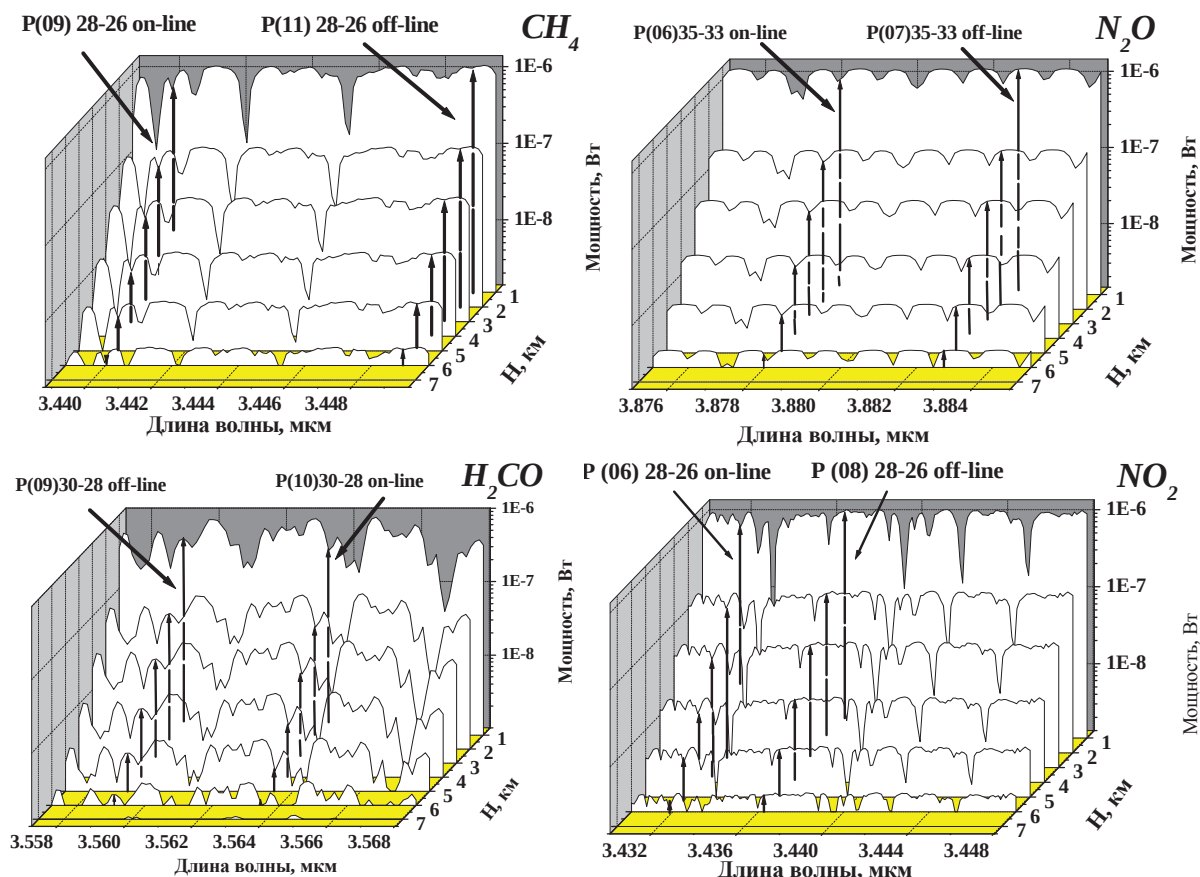


Рис. 3. Пространственно и спектрально разрешенные лидарные эхо-сигналы в области выбранных длины волны зондирования МГС атмосферы

Fig. 3. Space and spectral resolved lidar echo-signals within the selected wave length of atmosphere gas component sensing

На выбранных с помощью разработанной системы «LIDAS» длинах волн для зондирования метана в области спектра 3,440 мкм и закиси азота – 3,877 мкм (табл. 1) проведены лабораторные эксперименты по лазерному зондированию этих МГС атмосферы при реализации трассовой схемы МДП.

Измерение поглощения и суммарного ослабления рассеянного от топографической мишени излучения, прошедшего через среду с исследуемым газом, проводилось с помощью калориметров «OPHIR 3A-SH» и криогенных фоторезисторов «СВОД». Оптическая схема экспериментов по измерению коэффициента поглощения и коэффициента ослабления излучения обертоного СО-лазера в метане и закиси азота представлена на рис. 4.

Лазерный резонатор обертоного СО-лазера был образован сферическим зеркалом и дифракционной решеткой (420 штр./мм), работающей в режиме автоколлимации в первом порядке дифракции и выводящей излучение в нулевой порядок. Апертура лазерного пучка определялась внутрирезонаторной диафрагмой диаметром 25 мм. Для юстировки лазерного резонатора применялся He-Ne-лазер. Изменение спектральной линии излучения лазера осуществлялось поворотом дифракционной решетки.

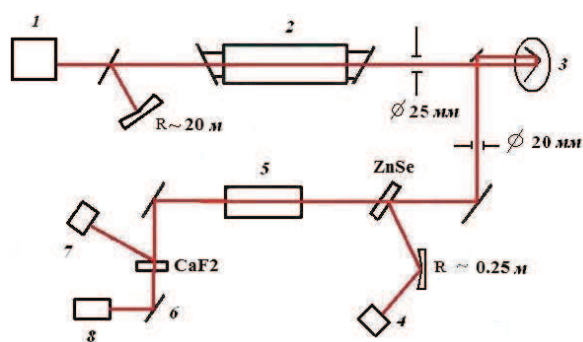


Рис. 4. Схема экспериментальной установки для измерения поглощения, а также ослабления рассеянного от топографической мишени излучения, прошедшего через среду с исследуемым газом (1 – He-Ne-лазер; 2 – СО-лазер; 3 – дифракционная решетка; 4 – калориметр Ophir 3A-SH; 5 – поглощающая кювета (L=10 см); 6 – топоцель; 7 – ИК-спектрометр/калориметр Ophir 3A-SH; 8 – фоторезистор «СВОД»)

Fig. 4. Diagram of the experimental unit for measuring absorption and attenuation of radiation diffused from topographic target and got through the medium with the gas (1 – He-Ne-laser; 2 – CO-laser; 3 – diffraction grid; 4 – calorimeter Ophir 3A-SH; 5 – absorbing cell (L=10 cm); 6 – topographic aim; 7 – IR-spectrometer/calorimeter Ophir 3A-SH; 8 – photoresistance cell «СВОД»)

В данной конфигурации схемы в кювету длиной 10 см при давлении 1 атм напускалась смесь газов: исследуемые газовые составляющие с азотом ($N_2O:N_2$, $CH_4:N_2$) в пропорции 1:24, при концентрации поглощающего газа 4 %. Для измерения энергии лазерного импульса E_0 часть лазерного излучения, прошедшего диафрагму диаметром 20 мм, направлялось на первый калориметр посредством отражения от плоскопараллельной пластины из ZnSe. После прохождения лазерного луча через кювету часть излучения направлялась на второй калориметр/ИКС (инфракрасный спектрометр) посредством отражения от плоскопараллельной пластины CaF_2 . Второй калориметр измерял энергию лазерного луча E , прошедшего через поглощающую кювету. Поглощение излучения вычислялось в соответствии с законом Бугера–Ламберта–Бэра. Другая часть лазерного излучения направлялась на топоцель, расположенную вслед за пластиной CaF_2 . В качестве топоцели использовался диффузно-рассеивающий отражатель с альбедо 0,8. Фоторезистором «СВОД» регистрировались энергия излучения, прошедшего через среду с исследуемым газом, и терявшаяся часть излучения при отражении от топоцели. Результаты расчета и измерений поглощения и ослабления для закиси азота и метана представлены в табл. 3, 4.

Таблица 3. Результаты расчета и измерений поглощения и ослабления для закиси азота

Table 3. Results of calculation and measurement of absorption and attenuation for nitrogen oxide

Длина волны в воздухе, мкм Wave length in the air, μm	Лазерный переход ($V+2 \rightarrow V$) Laser transition	Коэфф. поглощения, cm^{-1} (расчет) Absorption coefficient (calculation)	Коэфф. поглощения, cm^{-1} (эксперимент) Absorption coefficient (experiment)	Коэфф. ослабления, cm^{-1} (эксперимент) Attenuation coefficient (experiment)
3,841	32	0,0014	0,0095	—
3,852	32	0,0067	0,0004	0,0129
3,877	33	0,1178	0,0953	0,1202
3,892	33	0,0209	0,0502	—
3,897	33	0,0102	0,0072	—
3,907	33	0,0508	0,0262	0,0029
3,918	33	0,0307	0,0223	0,0066
3,930	33	0,0061	0,0014	0,0185

Из приведенных в таблицах экспериментальных данных по измерению поглощения и ослабления видно, что измеренные (поглощение и ослабление) и рассчитанные (поглощение) значения находятся в удовлетворительном согласии во всем спектральном интервале, в котором произведены измерения. Некоторые расхождения расчета и измерений поглощения метана можно объяснить влиянием остаточного мешающего поглощения водяного пара в измерительной кювете либо (для расчета коэффициента ослабления) неоднородностью рассеянного от топоцели лазерного излучения, прошедшего через среду с исследуемой смесью газов. Стоит также учитывать погрешность измере-

ния величины энергии излучения калориметром OPHIR 3A-SH, которая не превышает 5 %.

Таблица 4. Результаты расчета и измерений поглощения и рассеяния для метана

Table 4. Results of calculation and measurements of absorption and diffusion for methane

Длина волны в воздухе, мкм Wave length in the air, μm	Лазерный переход ($V+2 \rightarrow V$) Laser transition	Коэфф. поглощения, cm^{-1} (расчет) Absorption coefficient (calculation)	Коэфф. поглощения, cm^{-1} (эксперимент) Absorption coefficient (experiment)	Коэфф. ослабления, cm^{-1} (эксперимент) Attenuation coefficient (experiment)
3,328	24	0,0025	—	0,0090
3,336	24	0,0005	0,00462	0,0151
3,345	24	0,0381	0,0199	0,0276
3,432	26	0,0003	0,0029	—
3,440	26	0,0247	0,0078	0,0564
3,444	26	0,0011	—	0,0563
3,453	26	0,1159	0,1040	0,1733

Для выбранных при работе по топоцели длин волн зондирования метана и закиси азота была решена обратная задача восстановления концентраций данных МГС в поглощающей кювете 10 см с помощью оберточного СО-лазера при анализе полученных в ходе выполнения эксперимента коэффициентов поглощения. Результаты восстановления концентрации и сравнение с теоретическими данными представлены на рис. 5.

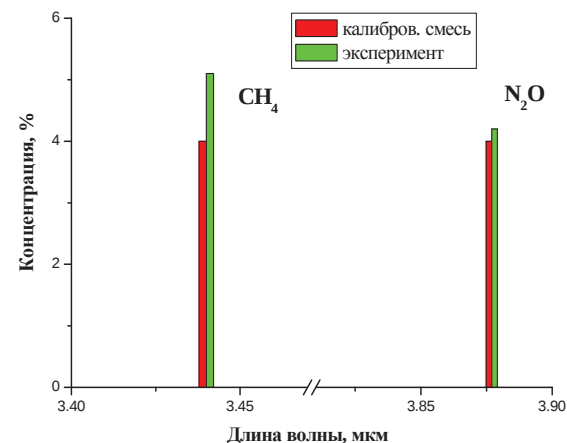


Рис. 5. Восстановление концентраций закиси азота и метана при работе на выбранных длинах волн зондирования излучением оберточного СО-лазера

Fig. 5. Recovery of nitrogen oxide and methane concentrations when operating at the selected wave lengths of sensing by the overtone CO-laser

Из рисунка видно, что на решение обратной задачи восстановления концентраций большое влияние оказывает точность измерения коэффициентов поглощения исследуемых МГС.

Проведенные на основе численного моделирования тестовые лабораторные эксперименты по измерению поглощения и ослабления линий излучения оберточного СО-лазера в смесях с исследуемы-

ми газами дают приемлемое соответствие рассчитанных значений с измеренными, кроме нескольких неинформативных длин волн, что позволяет применять разработанную методику поиска длин волн при реализации метода дифференциального поглощения. Достоверность полученных результатов подтверждается решением обратной задачи по восстановлению концентраций исследуемых газовых компонентов при анализе полученных в ходе выполнения эксперимента коэффициентов поглощения.

В заключение можно сделать следующие выводы:

1. Разработанная программно-аналитическая система «LIDAS» позволяет определить информативные длины волн лазерного зондирования различных МГС атмосферы, с ее помощью можно проводить численное моделирование лидарного зондирования МГС атмосферы, оценивать систематические ошибки восстановления профилей атмосферных газов, вырабатывать требования к лидарам дифференциального поглощения, а также планировать и проводить эксперименты по лидарным измерениям профилей МГС атмосферы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энгель М.В., Афонин С.В., Белов В.В. Web-ресурс для атмосферной коррекции спутниковых данных // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318. – № 5. – С. 94–99.
2. Васильев Б.И., Маннун У.М. ИК лидары дифференциального поглощения для экологического мониторинга окружающей среды // Квантовая электроника. – 2006. – Т. 36. – № 9. – С. 801–820.
3. Андреев Ю.М., Гейко П.П., Самохвалов И.В. Зондирование газовых загрязнений атмосферы методом дифференциального поглощения в ИК-области спектра // Оптика атмосферы и океана. – 2003. – Т. 16. – № 9. – С. 782–791.
4. Weitkamp C. Lidar. Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere. – Berlin: Springer, 2005. – 460 p.
5. Дистанционное зондирование закиси азота и метана с использованием линий излучения обертонового СО-лазера / А.А. Ионин, Ю.М. Климачев, А.Ю. Козлов, А.А. Котков, О.А. Романовский, О.В. Харченко, С.В. Яковлев // Журнал прикладной спектроскопии. – 2014. – Т. 81. – № 2. – С. 313–316.
6. Romanovskii O.A. Airborne DIAL Lidar Gas Analysis of the Atmosphere by Middle IR Gas Lasers: Numerical Modeling // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – 2008. – V. 17. – № 2. – P. 131–137.
7. The Possibilities of a Strontium Vapor Laser Using for Laser Using for Laser Sensing of Minor Gaseous Components of the Atmosphere / A.V. Vasiljeva, Yu.P. Polunin, O.A. Romanovskii, A.N. Soldatov, O.V. Kharchenko, N.A. Yudin // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – 2009. – V. 19. – № 2. – P. 142–149.
8. Geiko P.P., Tikhomirov A.A. Remote Measurement of Chemical Warfare Agents by Differential Absorption CO₂ Lidar // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – 2011. – V. 20. – № 1. – P. 71–75.
9. Лидарные технологии дистанционного зондирования параметров атмосферы / В.Д. Бурлаков, С.И. Долгий, А.П. Макеев, Г.Г. Матвиенко, А.В. Невзоров, А.Н. Солдатов, О.А. Романовский, О.В. Харченко, С.В. Яковлев // Оптика атмосферы и океана. – 2013. – Т. 26. – № 10. – С. 829–837.
2. Проведенное с помощью системы «LIDAS» численное моделирование показало, что при использовании лидара на основе обертонового СО-лазера в диапазоне высот 0–5 км при диаметре приемной оптики 0,3 м и пространственном разрешении 1 км уровень лидарных эхо-сигналов для всех исследуемых газов превышает уровень эквивалентной мощности шума фотоприемника $NEP=10^{-9}$ Вт.
3. Эксперименты по лазерной диагностике газового состава атмосферы обертонным СО-лазером подтвердили результат предварительной оценки эффективности применения МДП с учетом требований к спектрально-энергетическим параметрам зондирующего комплекса, рассчитанных разработанной программно-алгоритмической системой «LIDAS».

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 13-05-98074-р_сибирь-а), Российского научного фонда (Соглашение № 14-27-00022 в части проведения численного моделирования лидарного зондирования), гранта Президента РФ по поддержке ведущих научных школ НШ-4714.2014.5 и программы повышения конкурентоспособности TGU (Tomsk State University Competitiveness Improvement Program).

10. Романовский О.А., Харченко О.В., Яковлев С.В. Методические аспекты лидарного зондирования малых газовых составляющих атмосферы по методу дифференциального поглощения // Журнал прикладной спектроскопии. – 2012. – Т. 79. – № 5. – С. 799–805.
11. Simulation of gas analysis of the atmosphere by long path method: Computer Code LPM / V.V. Zuev, A.A. Mitsel', M.Yu. Kataev, I.V. Ptashnik, K.M. Firsov // Computers in Physics. – 1995. – V. 9. – № 6. – P. 649–656.
12. The Computer Code SAGDAM for Simulating the Laser Sounding of Atmospheric Gases / K.M. Firsov, I.V. Ptashnik, V.V. Zuev, M.Yu. Kataev, A.A. Mitsel' // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. – 1999. – V. 61. – № 1. – P. 25–37.
13. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование / пер. с англ. И.Г. Городецкого, В.В. Филюшкина / под ред. А.Б. Карасева. – М.: Мир, 1987. – 550 с.
14. The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database / L.S., Rothman I.E. Gordon, A. Barbe, D.Ch. Benner, P.F. Bernath, M. Birk, V. Boudon, L.R. Brown, A. Campargue, J.P. Champion, K. Chance, L.H. Coudert, V. Dana, V.M. Devi, S. Fally, J.M. Flaud, R.R. Gamache, A. Goldman, D. Jacquemart, I. Kleiner, N. Lacome, W.J. Lafferty, J.Y. Mandin, S.T. Massie, S. Mikhailenko, C.E. Miller, N. Moazzen-Ahmadi, O.V. Naumenko, A. Nikitin, J. Orphal, A. Predoi-Cross, V. Perevalov, A. Perrin, C.P. Rinsland, M. Rotger, M. Simeckov, M.A.H. Smith, K. Sung, S. Tashkun, J. Tennyson, R.A. Toth, A.C. Vandaele, J.V. Auwera // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. – 2009. – № 110. – P. 532–572.
15. Optical properties of atmosphere. Report AFCRL-71-0297 / R.A. McClatchey, R.W. Fenn, J.E.A. Selby, F.E. Volz, J.S. Garling. – Bedford: Mass, 1971. – 86 p.
16. Зуев В.Е., Комаров В.С. Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы. – Л.: Гидрометеоздат, 1986. – 264 с.
17. Креков Г.М., Рахимов Р.Ф. Оптико-локационная модель континентального аэрозоля. – Новосибирск: Наука, 1982. – 199 с.
18. Wideband CO laser in problems of laser sensing of minor gaseous components in the atmosphere / A.A. Ionin, Yu.M. Klimachev,

- A.Yu. Kozlov, A.A. Kotkov, O.A. Romanovskii, L.V. Seleznev, D.V. Sinityn, O.V. Kharchenko, A.V. Shelestovich, S.V. Yakovlev // Russian Physics Journal. – 2008. – V. 51. – № 11. – P. 1200–1207.
19. Resonant absorption of first-overtone CO laser radiation by atmospheric water vapor and pollutants / O.G. Buzykin, A.A. Ionin, S.V. Ivanov, A.A. Kotkov, L.V. Seleznev, A.V. Shustov // Laser and Particle Beams. – 2000. – № 18. – P. 697–713.
20. Multiline Laser Probing for Active Media CO: He, CO: N₂, and CO: O₂ in Wide-Aperture Pulsed Amplifier / A. Ionin, Yu. Klimachev, A. Kotkov, A. Kozlov, O. Rulev, L. Seleznev, D. Sinityn, S. Vetoshkin // Journal of Russian Laser Research. – 2006. – V. 27. – № 1. – P. 33–69.

UDC 551.510.532; 551.501.816

Поступила 13.05.2014 г.

LIDAR SOUNDING OF ATMOSPHERE TRACE GASES BY THE DIFFERENTIAL ABSORPTION METHOD: SIMULATION AND EXPERIMENT RESULTS

Dmitrii A. Bochkovskii,

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1, Academician Zuev square, Tomsk, 634021, Russia. E-mail: moto@iao.ru

Oleg A. Romanovskii,

Dr. Sc., V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1, Academician Zuev square, Tomsk, 634021, Russia; National Research Tomsk State University, 36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: roa@iao.ru

Olga V. Kharchenko,

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1, Academician Zuev square Tomsk, 634021, Russia. E-mail: olya@iao.ru

Semen V. Yakovlev,

Cand. Sc., V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1, Academician Zuev square, Tomsk, 634021, Russia; National Research Tomsk State University, 36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: ysv@iao.ru

Relevance of the research is caused by the necessity to develop laser sensing methods for solving the environment monitoring problem.

The main aim of the study is the development of the program-algorithmic system for laser remote sensing of gas components in atmosphere using differential absorption, the search of the informative wavelengths, simulation of gas remote sensing and experiments at selected wavelengths for remote sensing of atmosphere gas components.

The methods used in the study: differential absorption method based on resonant absorption of laser radiation within a selective absorption line of the analyzed gas component.

The results: The developed program-algorithmic system «LIDAS» allows determining informative wavelengths for laser remote sensing of atmosphere gas components and simulating as well the remote sensing of gases in atmosphere; estimating systematic errors of atmospheric gas profiles reduction; working out requirements for differentiation absorption lidars; planning and carrying out the experiments on lidar measurements of gas profiles. The numerical simulation showed that when using lidar based on overtone CO-laser in the 0–5 km height region at diameter of the receiving optics 0,3 m and spatial resolution of 1 km the echo-signal level for all measured gases exceeds the level of the NEP=10⁻⁹ W. The experiments on laser diagnostics of atmosphere gas components by overtone CO-laser confirmed the results of preliminary evaluation of the efficiency of applying differential absorption considering the requirements of spectral energy parameters of sensing complex, computed by the developed algorithmic system «LIDAS».

Key words:

Lidar, gas analysis, atmosphere, differential absorption.

The research was supported by Russian Foundation for Basic Research (RFFI grant № 13–05–98074-r_sibir-a), the Russian science Foundation (Agreement № 14–27–00022 to conduct numerical simulation of lidar sensing), grant of the President of the RF on support of leading scientific schools SS-4714.2014.5 and the program of competitive growth TSU (Tomsk State University Competitiveness Improvement Program).

REFERENCES

- Engel M.V., Afonin S.V., Belov V.V. Web-resources dlya atmosferynoy korrektsii sputnikovykh dannyykh [Web resource for atmospheric correction of satellite data]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 318, no. 5, pp. 94–99.
- Vasilev B.I., Mannun U.M. IR differential-absorption lidars for ecological monitoring of the environment *Quantum Electronics*, 2006, vol. 36, no. 9, pp. 801–820. DOI: 10.1070/QE2006v036n09ABEH006577
- Andreev Yu.M., Geiko P.P., Samokhvalov I.V. Sensing of gaseous atmospheric pollutants by DIAL technique in the IR spectral region. *Atmospheric and oceanic optics*, 2003, vol. 16, no. 09, pp. 721–728.
- Weitkamp C. Lidar. Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere. Berlin, Springer, 2005. 460 p.
- Ionin A.A., Klimachev Yu.M., Kozlov A.Yu., Kotkov A.A., Romanovskii O.A., Kharchenko O.V., Yakovlev S.V. Remote Sensing of Nitrous Oxide and Methane Using Emission Lines of a CO Overtone Laser. *Journal of applied spectroscopy*, 2014, vol. 81, no. 2, pp. 309–312.
- Romanovskii O.A. Airborne DIAL Lidar Gas Analysis of the Atmosphere by Middle IR Gas Lasers: Numerical Modeling. *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*, 2008, vol. 17, no. 2, pp. 131–137.
- Vasiljeva A.V., Polunin Yu.P., Romanovskii O.A., Soldatov A.N., Kharchenko O.V., Yudin N.A. The Possibilities of a Strontium Vapor Laser Using for Laser Sensing of Minor Gaseous Components of the Atmosphere. *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*, 2009, vol. 19, no. 2, pp. 142–149.
- Geiko P.P., Tikhomirov A.A. Remote Measurement of Chemical Warfare Agents by Differential Absorption CO₂ Lidar. *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*, 2011, vol. 20, no. 1, pp. 71–75.
- Burlakov V.D., Dolgii S.I., Makeev A.P., Matvienko G.G., Nevzorov A.V., Soldatov A.N., Romanovskii O.A., Kharchenko O.V., Yakovlev S.V. Lidarnye tehnologii distantsionnogo zondirovaniya parametrov atmosfery [Lidar technologies for remote sensing of atmospheric parameters]. *Optika atmosfery i okeana*, 2013, vol. 26, no. 10, pp. 829–837.
- Romanovskii O.A., Kharchenko O.V., Yakovlev S.V. Methodological aspects of lidar sounding of trace gases of the atmosphere by differential absorption. *Journal of applied spectroscopy*, 2012, vol. 79, no. 5, pp. 793–800.
- Zuev V.V., Mitsel' A.A., Kataev M.Yu., Ptashnik I.V., Firsov K.M. Simulation of gas analysis of the atmosphere by long path method: Computer Code LPM. *Computers in Physics*, 1995, vol. 9, no. 6, pp. 649–656.
- Firsov K.M., Ptashnik I.V., Zuev V.V., Kataev M.Yu., Mitsel' A.A. The Computer Code SAGDAM for Simulating the Laser Sounding of Atmospheric Gases. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1999, vol. 61, no. 1, pp. 25–37.
- Measures R.M. *Laser Remote Sensing*. New York, Wiley, 1984. 510 p.
- Rothman L.S., Gordon I.E., Barbe A., Benner D.Ch., Bernath P.F., Birk M., Boudon V., Brown L.R., Campargue A., Champion J.P., Chance K., Coudert L.H., Dana V., Devi V.M., Fally S., Flaud J.M., Gamache R.R., Goldman A., Jacquemart D., Kleiner I., Lacombe N., Lafferty W.J., Mandin J.Y., Massie S.T., Mikhailenko S., Miller C.E., Moazzen-Ahmadi N., Naumenko O.V., Nikitin A., Orphal J., Predoi-Cross A., Perevalov V., Perrin A., Rinsland C.P., Rotger M., Simeckov M., Smith M.A.H., Sung K., Tashkun S., Tennyson J., Toth R.A., Vandaele A.C., Auwers J.V. The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2009, no. 110, pp. 532–572.
- 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.
- Zuev V.E., Komarov V.S. *Statisticheskie modeli temperatury i gazovykh komponent atmosfery* [Statistical model of temperature and gaseous components of the atmosphere]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1986. 264 p.
- Krekov G.M., Rakhimov R.F. *Optikolokatsionnaya model kontinentalnogo aerosolya* [Optic-locational model of continental aerosol]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1982. 199 p.
- Ionin A.A., Klimachev Yu.M., Kozlov A.Yu., Kotkov A.A., Romanovskii O.A., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V., Kharchenko O.V., Shelestovich A.V., Yakovlev S.V. Wideband CO laser in problems of laser sensing of minor gaseous components in the atmosphere. *Russian Physics Journal*, 2008, vol. 51, no. 11, pp. 1200–1207.
- Buzykin O. G., Ionin A. A., Ivanov S. V., Kotkov A.A., Seleznev L.V. and Shustov A.V. Resonant absorption of first-overtone CO laser radiation by atmospheric water vapor and pollutants. *Laser and Particle Beams*, 2000, no. 18, pp. 697–713.
- Ionin A., Klimachev Yu., Kotkov A., Kozlov A., Rulev O., Seleznev L., Sinitsyn D., Vetoshkin S. Multiline Laser Probing for Active Media CO: He, CO: N₂, and CO: O₂ in Wide-Aperture Pulsed Amplifier. *Journal of Russian Laser Research*, 2006, vol. 27, no. 1, pp. 33–69.

Received: 13 may 2014.