

УДК 621.373.826

Анализ возможностей обнаружения приземных аномальных концентраций окислов азота, аммиака и метана лидаром бортового базирования

О. А. Романовский

Томский государственный университет, Институт оптики атмосферы СО РАН,
г. Томск, Россия

Приведены результаты анализа возможностей обнаружения приземных аномальных концентраций окислов азота, аммиака и метана лидаром бортового базирования, в котором используется метод дифференциального поглощения (МДП). Приведено численное моделирование дистанционного определения выбросов окислов азота с использованием преобразованного по частоте излучения СО и СО₂-лазеров при самолетном базировании МДП-лидара, работающего в средней ИК-области спектра, показавшее, что возможно измерение приземных концентраций окислов азота на уровне 0,01 ПДК. Выбраны информативные длины волн для зондирования выбросов метана и аммиака различной интенсивности из трубопроводов с применением перестраиваемого ТЕА СО₂-лазера с преобразователями частоты излучения в работающем по топоцели МДП-лидаре вертолетного базирования на расстояниях до 1 км.

В последнее время вследствие ухудшения всемирной экологической ситуации все более актуальной становится проблема контроля загрязняющих атмосферу малых газовых составляющих (МГС), при этом особое внимание уделяется дистанционным методам лазерного зондирования, позволяющим в отличие от пассивных методов получать оперативную широкомасштабную информацию о приземном содержании опасных для здоровья человека МГС, в том числе окислов азота, аммиака и метана, в регионах с интенсивной индустриальной инфраструктурой.

Перспективным путем решения этой проблемы является использование лидаров бортового базирования, работающих по методу дифференциального поглощения (МДП-лидары) с применением в качестве источника излучения ТЕА СО₂-лазера с преобразователями частоты излучения.

К настоящему времени реализованы в натуральных экспериментах [1—3] и проанализированы, в том числе с использованием МДП-лидаров бортового базирования, с помощью численного моделирования [4—6] возможности измерения большинства атмосферных МГС.

В данной работе с помощью численного моделирования решаются следующие задачи:

оценка возможностей определения выбросов NO и NO₂ в приземных слоях атмосферы с использованием преобразованных частот излучения СО и СО₂-лазеров в лидаре бортового базирования по МДП;

анализ применимости перестраиваемого ТЕА СО₂-лазера с преобразователями частоты излучения в работающем по топоцели лидаре бортового (вертолетного) базирования для дистанционного определения выбросов метана и аммиака различной интенсивности из трубопроводов на расстояниях до 1 км.

Оценка возможностей определения выбросов окислов азота

Проектирование и разработка сложной лидарной техники, в том числе бортовых МДП-лидаров, требует предварительного численного моделирования для оценки потенциальных возможностей создаваемых лидарных систем. Подобные расчеты дают возможность определения оптимальных схем и условий зондирования, в том числе в случае использования в лидарных системах параметрических преобразователей частоты излучения на основе нелинейных кристаллов тройных полупроводников ZnGeP₂, CdGeAs₂ и Tl₃AsSe₃, позволяющих путем генерации вторых гармоник и суммарных частот излучения СО и СО₂-лазеров покрывать с эффективностью до десятков процентов диапазон полос поглощения NO и NO₂ со средним расстоянием между синтезированными линиями излучения, меньшим 0,003 см⁻¹ [7]. К тому же фотоприемники, работающие в этой области спектра, например, на основе InSb, имеют эффективность, на два—три порядка большую, чем фотоприемники диапазона 9—11 мкм [8]. Наконец, в области генерации вторых гармоник и суммарных частот излучения СО и СО₂-лазеров эхо-сигналы от атмосферного аэрозоля в несколько раз больше, чем в области спектра 9—11 мкм [9]. Все это свидетельствует о перспективности лидарного зондирования выбросов окислов азота на преобразованных частотах СО и СО₂-лазеров.

В данной работе с помощью численного моделирования проведена оценка возможностей определения выбросов NO и NO₂ в приземных слоях атмосферы с использованием преобразованных частот излучения СО и СО₂-лазеров в лидаре бортового базирования по МДП.

Мощности принимаемых лидарных сигналов при проведении численного моделирования рассчитывались с помощью известного уравнения лазерной локации [10]. В расчетах использованы атмосферные оптико-метеорологические модели [9, 11] для условий лета средних широт. Спектральные параметры линий поглощения атмосферных газов заимствованы из атласа [12]. Используемые в расчетах коэффициенты рассеяния в направлении назад определялись с помощью статистических профилей лидарных отношений из модели Крекова и Рахимова [9].

В расчетах были задействованы длины волн зондирования NO и NO₂, определенные по разработанной нами методике [7, 13]. Моделирование зондирования NO проводили на частоте 1929,031 см⁻¹, совпадающей со второй гармоникой линии излучения 10R(7) CO₂-лазера. Вторую гармонику линии излучения 10R(4) использовали в качестве референтной частоты. При численном моделировании определения выбросов NO₂ использовали суммарную частоту линий излучения P(19) CO и 9R(20) CO₂-лазера. Референтная частота зондирования может быть получена путем суммирования линий излучения P(15) CO и 9R(16) CO₂-лазера.

В расчетах моделировались приземные выбросы NO и NO₂ от фоновое уровня [11] до 10 ПДК рабочей зоны, которые согласно [14] составляют 30 и 2 мг/м³ для NO и NO₂, соответственно. Задавали спадание концентраций от приземного выброса до фоновое уровня в пределах атмосферного слоя 0—0,5 км для NO₂ и 0—0,1 км для NO. Предполагалось использование в качестве топишени подстилающей поверхности. Учитывали также обратноотраженные сигналы от аэрозолей атмосферы. Высоту полета самолета изменяли от 300 м до 3 км; угол зондирования составил (от зенита) 135°. Среднее альbedo полагали равным 10 %. Расчет профилей коэффициентов поглощения проводился по фойгтовскому контуру с учетом возможного влияния крыльев соседних линий поглощения в диапазоне 20 см⁻¹, при этом учитывалось также мешающее поглощение водяным паром и CO₂ в случае моделирования зондирования NO и водяным паром и метаном — NO₂.

Численное моделирование проводили для следующих параметров лидарной системы самолетного базирования: энергия лазерного импульса — 0,1 Дж; NEP (эквивалентная мощность шума) — 10⁻⁹ Вт; диаметр приемного телескопа — 0,3 м. Общая эффективность приемопередающей системы считали равной 0,004.

На рис. 1 приведены зависимости случайной ошибки определения интегрального содержания окиси и двуокиси азота от высоты полета самолета. Из рис. 1 видно, что возможно определение приземных выбросов окислов азота на уровне 0,01 ПДК при высоте полета самолета 1 км для NO₂ и 1,5 км для NO при уровне случайных ошибок 10 %.

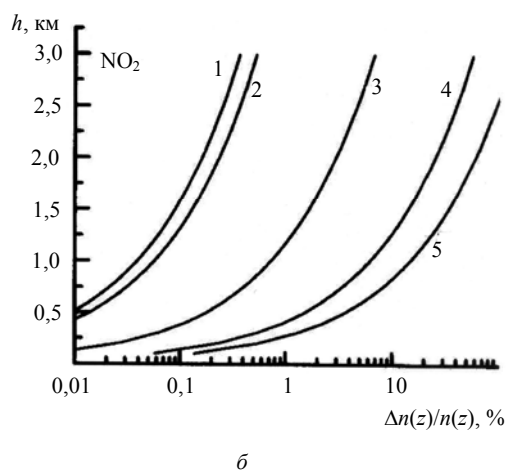
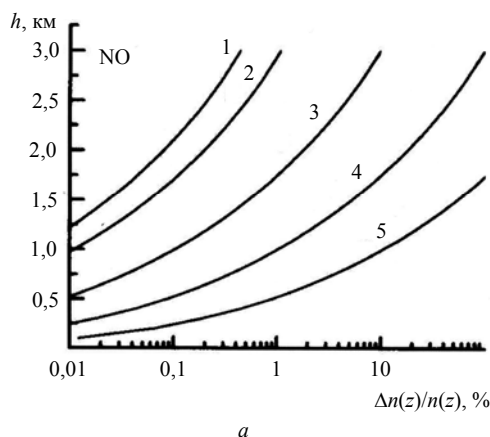


Рис. 1. Зависимости случайной ошибки определения интегрального содержания NO (а) и NO₂ (б) от высоты полета самолета:

1 — уровень приземного выброса окислов азота 10 ПДК; 2 — ПДК; 3 — 0,1 ПДК; 4 — 0,01 ПДК; 5 — 0,001 ПДК

Таким образом, применение преобразованного по частоте излучения CO и CO₂-лазеров при бортовом базировании лидара дифференциального поглощения, работающего в средней ИК-области спектра, позволяет определять приземные выбросы окислов азота на уровне 0,01 ПДК.

Анализ применимости ТЕА CO₂-лазера для определения выбросов метана и аммиака

Для зондирования метана по МДП возможно использование полос поглощения в ближней и средней ИК-области спектра. Спектроскопические параметры этих полос, заимствованные из [15], приведены в табл. 1. Положение полос поглощения метана и их интенсивности в этой области спектра иллюстрируются рис. 2.

Таблица 1

Спектроскопические параметры полос поглощения метана C¹²H₄

Номер полосы поглощения	Кол-во линий	ν_{\min} , см ⁻¹	ν_{\max} , см ⁻¹	I_{\min} , см/мол	I_{\max} , см/мол	I_{sum} , см/мол
1	4017	944,397	1627,974	2,30·10 ⁻²⁷	9,68·10 ⁻²⁰	5,14·10 ⁻¹⁹
2	2397	1109,032	1605,075	4,04·10 ⁻²⁶	3,82·10 ⁻²²	3,65·10 ⁻²⁰

3	2641	1163,297	1865,705	$5,94 \cdot 10^{-28}$	$1,03 \cdot 10^{-21}$	$5,44 \cdot 10^{-20}$
4	1266	2255,492	2847,219	$1,32 \cdot 10^{-24}$	$8,39 \cdot 10^{-22}$	$5,50 \cdot 10^{-20}$
5	839	2511,381	3175,006	$1,00 \cdot 10^{-24}$	$1,10 \cdot 10^{-21}$	$1,45 \cdot 10^{-20}$
6	2300	2573,104	3167,121	$1,22 \cdot 10^{-24}$	$5,18 \cdot 10^{-21}$	$3,78 \cdot 10^{-19}$
7	1903	2809,527	3209,941	$1,48 \cdot 10^{-24}$	$2,13 \cdot 10^{-19}$	$1,08 \cdot 10^{-17}$
8	712	2880,787	3153,543	$2,20 \cdot 10^{-24}$	$6,17 \cdot 10^{-22}$	$4,45 \cdot 10^{-20}$
9	754	2919,131	3253,323	$1,00 \cdot 10^{-24}$	$7,16 \cdot 10^{-22}$	$3,40 \cdot 10^{-20}$
10	172	4136,164	4278,242	$1,90 \cdot 10^{-22}$	$5,24 \cdot 10^{-21}$	$2,40 \cdot 10^{-19}$
11	958	4147,844	4489,169	$1,56 \cdot 10^{-23}$	$5,53 \cdot 10^{-21}$	$4,08 \cdot 10^{-19}$
12	388	4409,945	4666,559	$2,05 \cdot 10^{-23}$	$1,21 \cdot 10^{-21}$	$6,24 \cdot 10^{-20}$
13	144	5991,066	6106,295	$4,06 \cdot 10^{-23}$	$1,32 \cdot 10^{-21}$	$5,97 \cdot 10^{-20}$

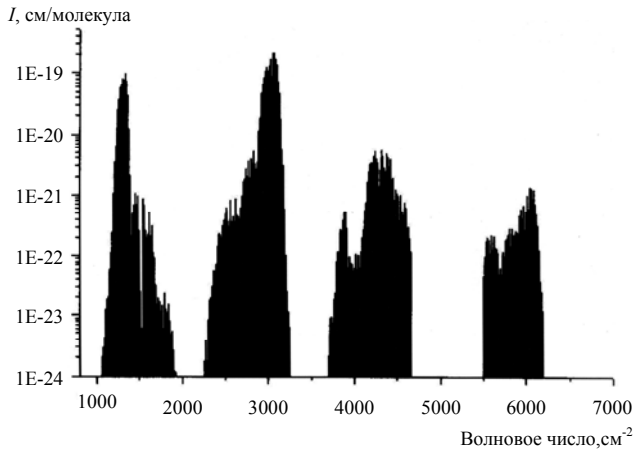


Рис. 2. Положение и интенсивность I полос поглощения метана

Как видно из табл. 1 и рис. 2, наиболее мощной является полоса поглощения с центром около 3 мкм ($\sim 3000 \text{ см}^{-1}$, полоса № 7 с суммарной интенсивностью $1,08 \cdot 10^{-17} \text{ см} \cdot \text{молекула}^{-1}$), в пределах которой имеются богатые возможности выбора оптимальных длин волн для зондирования фоновых и надфоновых концентраций метана. К тому же в этот же диапазон попадают еще несколько полос поглощения с меньшей интенсивностью (полосы № 4—6 и № 8—9), что позволяет найти информативные длины волн для зондирования выбросов метана с концентрацией, превышающей фоновую на несколько порядков. Имеются также полосы поглощения метана с центрами около 7,5 мкм ($\sim 1300 \text{ см}^{-1}$, полосы № 1—3), 2,2 мкм ($\sim 4500 \text{ см}^{-1}$, полосы № 10—12) и 1,66 мкм ($\sim 6000 \text{ см}^{-1}$, полоса № 13), но они имеют на 2—3 порядка меньшую интенсивность, что позволяет использовать их для лидарного зондирования метана лишь при больших концентрациях (больше 50—100 ppm).

В качестве исходных данных для численного моделирования в пакет SAGDAM [16] закладывались следующие параметры:

1. Геометрия трассы в виде схемы вертолетного лидарного зондирования метана представлена на рис. 3. При этом высота лидара составила 700 м; угол зондирования (от зенита) 135° . При данной геометрии длина трассы (от лидара до тополишени) составила 1 км. Среднее альbedo тополишени полагалось равным 10 %.

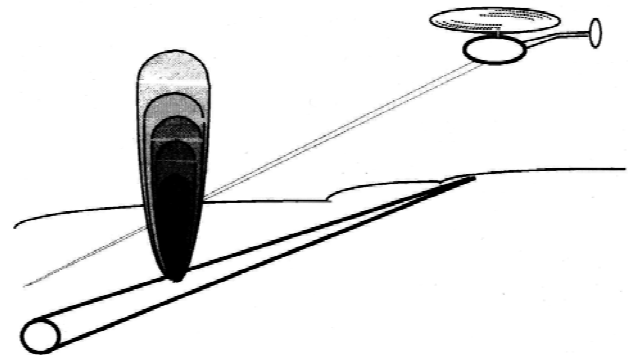


Рис. 3. Схема лидарного зондирования метана с борта вертолета

2. Параметры третьей гармоники излучения быстроперестраиваемого мини-ТЕА CO_2 лазера: диапазон длин волн излучения — 3040—3645 нм; полуширина линии излучения — 0,1—0,2 нм; частота повторения импульсов — 400 Гц; длительность импульсов излучения на полувысоте — 50 нс;

энергия импульсов излучения (третья гармоника) — 1—2 мДж; пиковая мощность излучения (третья гармоника) — 20—40 кВт;

частотная нестабильность излучения — 0,02 нм.

3. Приемник:

приемная апертура телескопа — $0,03 \text{ м}^2$;

передающая апертура — $0,01 \text{ м}^2$;

угол поля зрения приемного телескопа — 3 мрад;

ширина оптического фильтра — 20 нм;

электрическая полоса приемника — 50 МГц;

время накопления сигналов — 0,1 с;

пропускание приемной и передающей оптики 0,5 %; погрешность измерения единичного лидарного эхосигнала — 10 %;

NEP фотодетектора (на основе $\text{InSb}_{|\text{LN}_2}$), $1 \cdot 10^{-12} \text{ Вт/Гц}^{1/2}$.

4. Метеомодель: стандартная модель для лета средних широт [11] с фоновым содержанием метана и паров воды (как основного мешающего газа) в приземном слое 1,5 и $1,5 \cdot 10^4 \text{ ppm}$, соответственно. В процессе моделирования содержание метана в моделируемой облаке выброса диаметром 100 м около газопровода варьировало от фонового (1,5 ppm), до близкого к взрывоопасному (15000 ppm).

5. Аэрозольная модель: оптико-локационная модель континентального аэрозоля [9].

6. Фоновое излучение: для верхней оценки сигналной погрешности, обусловленной неучетом фона, дифференциальное фоновое излучение полагалось равным $0,003 \text{ Вт/(срад}\cdot\text{м}^2\cdot\text{нм)}$, что соответствует 10 % (альбедо) отраженной от поверхности околоземной солнечной радиации.

В результате численного моделирования для зондирования метана были отобраны четыре пары длин волн, информация о которых приведена в табл. 2. Из табл. 2 видно, что к рассмотрению предлагаются четыре оптимальных пары длин волн, две из которых находятся в 10R ветви генерации CO_2 -лазера, а две — в 9P ветви. При этом они являются одними из самых мощных линий генерации (номера линий от 12 до 20). В табл. 2 приведены также значения дифференциальных эффективных коэффициентов поглощения для выбранных пар длин волн. Их значения отличаются более чем на порядок, что связано с необходимостью детектирования большого динамического диапазона возможных значений концентрации метана при выбросе из трубопровода. При моделировании концентрация мета-

на в 100 м зоне выброса варьировала от фоновой — 1,5 ppm до близкой к взрывоопасной $\sim 15000 \text{ ppm}$.

Проведен поиск линий поглощения, пригодных для зондирования метана. В результате поиска были отобраны четыре пары линий, информация о которых приведена в табл. 2. Следует отметить, что они являются одними из самых мощных линий генерации.

Результаты анализа ожидаемых ошибок зондирования выбросов метана на выбранных информативных парах длин волн представлены на рис. 4, а, из которого видно, что в случае зондирования фоновой концентрации метана наиболее перспективной является пара линий № 1. При концентрации метана в зоне выброса более 15 ppm возможно также использование пары № 3 из табл. 2. Выбранные пары линий № 2 и 4 позволяют идентифицировать выбросы метана в диапазоне от 500 до 5000 ppm. Таким образом, предложенные соискателем пары линий из области генерации третьей гармоники TEA CO_2 -лазера позволяют идентифицировать с точностью до 10—15 % выбросы метана любой концентрации (от фоновой до взрывоопасной) при бортовом базировании лидара ДП.

Таблица 2

Оптимальные пары длин волн зондирования метана

N	N_{CH_4} , ppm	$\square v_{\text{on}}$, см^{-1}	$\square v_{\text{off}}$, см^{-1}	N_{on}	N_{off}	$\square K$, $\text{см}^{-1}\cdot\text{атм}^{-1}$
1	1,5—250	2927,7913	2923,8657	10R(20)	10R(18)	1,74—0,94
2	500—5000	2919,8655	2911,6416	10R(16)	10R(12)	0,07—0,05
3	1,5—250	3140,5627	3145,9824	9P(20)	9P(18)	1,8—1,14
4	500—15000	3156,5867	3161,7705	9P(14)	9P(12)	0,03—0,026

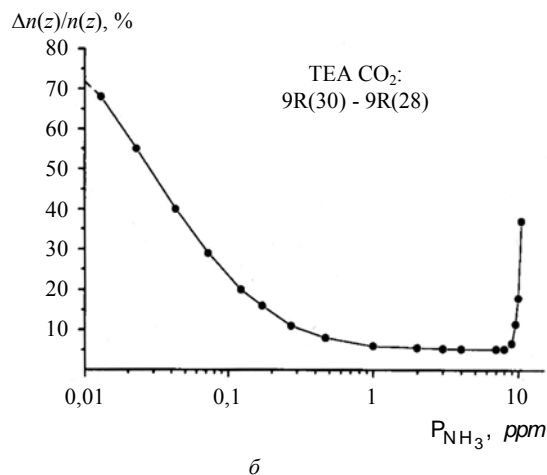
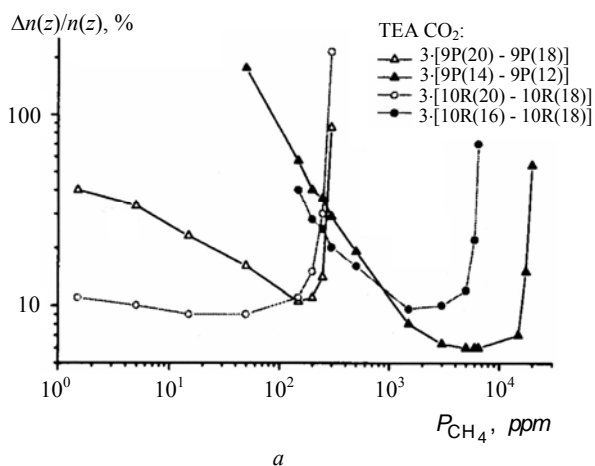


Рис. 4. Ошибки зондирования выбросов метана (а) и аммиака (б)

Результаты анализа ошибок определения выбросов аммиака при той же схеме зондирования приведены на рис. 4, б. Видно, что возможна регистрация выбросов аммиака на дальностях до 1 км с ошибками 5—10 % при концентрациях от 0,3 до 10 ppm.

Заключение

Таким образом, применение преобразованного по частоте излучения СО и CO_2 -лазеров при бортовом ба-

зировании лидара дифференциального поглощения, работающего в средней ИК-области спектра, позволяет определять приземные выбросы окислов азота на уровне 0,01 ПДК.

Использование третьей гармоники TEA CO_2 -лазера дает возможность идентификации выбросов метана из трубопровода при вертолетном базировании лидара дифференциального поглощения с ошибками 10—15 % для уровней концентраций метана от фоновой до взрывоопасной.

Результаты численного моделирования лидарного бортового зондирования выбросов аммиака показали,

что возможна их регистрация на дальностях до 1 км с ошибками 5—10 % при концентрациях от 0,3 до 10 ppm.

*Работа выполнена при поддержке
Федерального агентства по науке
и инновациям (грант РИ-16.0/019).*

Литература

1. Зуев В. В., Катаев М. Ю., Макогон М. М., Мицель А. А.// Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. № 8. С. 1136—1164.
2. Wulfmeyer V., Walter C.// Appl. Opt. 2001. V. 40. № 30. P. 5304—5320.
3. Altmann J., Lahmann W., and Weitkamp C.// Ibid. V. 19. № 20. P. 3453—3457.
4. Матвиенко Г. Г., Пташник И. В., Романовский О. А. и др.// Прикладная физика. 2002. № 1. С. 129—138.
5. Wulfmeyer V., Walter C.// Appl. Opt. 2001. V. 40. № 30. P. 5321—5336.
6. Matvienko G. G., Ponomarev Yu. N., Romanovskii O. A., Ptashnik I. V.// Proc. SPIE. V. 4546. P. 111—118.

7. Андреев Ю. М., Гейко П. П., Грибеноков А. И., Зуев В. В., Романовский О. А.// Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 3. С. 20—26.
8. Фотоприемники видимого и ИК диапазонов/ Под ред. Р. Дж. М. Кисса. — М.: Мир, 1985. — 452 с.
9. Креков Г. М., Рахимов Р. Ф. Оптико-локационная модель континентального аэрозоля. — Новосибирск: Наука, 1982. — 255 с.
10. Межерис Р. М. Лазерное зондирование атмосферы. — М.: Мир, 1988. — 565 с.
11. Зуев В. Е., Комаров В. С. Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы. — Л.: Гидрометеоздат, 1986. — 264 с.
12. Husson N., Chedin A., Scotte N.E. et. al.// Annales Geophysical. Fasc. 2. Serias A. 1986. P. 185—190.
13. Андреев Ю. М., Зуев В. В., Романовский О. А. Автоматизированная система поиска оптимальных длин волн для лазерного газоанализа методом дифференциального поглощения. Ч. I. Методика поиска. Деп. в ВИНТИ 25.05.88, рег. № 4058 – В88. М., 1988. 32 с.
14. Вредные вещества в промышленности/ Под ред. А. П. Пруткова. — Л.: Химия. 1977. — 608 с.
15. Rothman L. S., Gamache R. R., Tipping R. N. et. al.// J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 1992. V. 48. P. 469—507.
16. Firsov K. M., Kataev M. Yu., Mitsel' A. A., Ptashnik I. V., Zuev V. V.// J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 1999. V. 61. P. 25—37.

Статья поступила в редакцию 26 сентября 2005 г.

Analysis of possibility of detection of anomalous near-ground concentrations of nitrogen oxides, ammonia and methane by airborne lidar

O. A. Romanovsky

Institute of Atmosphere Optics, Tomsk State University, Tomsk, Russia

The results of analysis of possibility of detection of anomalous near-ground concentrations of nitrogen oxides, ammonia and methane by airborne lidar based on the method of differential absorption (MDA) are presented. Numerical simulation of remote detection of nitrogen oxides emission is carried out using the frequency-tuned radiation of CO and CO₂ lasers at installation of the MDA-lidar operating in the middle IR wavelength range onboard an aircraft. Calculations have shown that it is possible to measure near-ground concentrations of nitrogen oxides at the level of 0.01 of maximum permissible concentration (MPC). The wavelengths are selected which are the most informative for sensing the methane and ammonia emissions of different intensity from pipe-line by means of tunable TEA CO₂ laser with radiation frequency tuners in the airborne MDA-lidar operating with a topo-target at the distance up to 1 km.

УДК 669.71.536

Методы и средства определения утечки воздуха из модулей космической станции

Н. Д. Сёмкин, К. Е. Воронов, А. Н. Занин, И. В. Пияков

Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С. П. Королева,
г. Самара, Россия

Рассмотрены методы и средства регистрации места утечки воздуха из модуля космической станции, основанные на различных физических явлениях, таких как изменение градиента температуры, изменение давления и микроускорений, вызванные истечением струи воздуха в вакуум. Показана возможность регистрации места утечки воздуха с помощью ионизационного и масс-спектрометрического датчиков.

