

ЛАЗЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 535.621(075.8)

Лидар комбинационного рассеяния света для зондирования молекул оксидов в атмосфере

Шеманин В. Г.

*Новороссийский филиал Белгородского государственного технологического университета
имени В. Г. Шухова, 353919, Россия, Новороссийск, Мысхакское шоссе, 75*

email: shemanin-v-g@nb-bstu.ru

Выполнено численное решение лидарного уравнения для измерения концентрации молекул оксидов азота, серы и углерода на уровне ПДК и выше (в диапазоне от $2,6 \cdot 10^{18}$ до $1,1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$) лидаром комбинационного рассеяния света в атмосфере на расстоянии зондирования до 500 м в режиме синхронного счёта фотонов и выбора оптимальных параметров такого варианта лидара. Показано, что при зондировании лидаром комбинационного рассеяния света всех исследованных молекул в атмосфере с использованием лазерного излучения на длине волны 532 нм можно зарегистрировать концентрацию на уровне ПДК для диоксида серы за время измерения 616 с на расстоянии зондирования до 500 м, для диоксида и оксида углерода 21 и 25 с соответственно на том же расстоянии, для диоксида азота – во всём диапазоне расстояний за времена до 50 с, а для оксида азота только за время измерения до 5000 с.

Ключевые слова: лидар комбинационного рассеяния света, молекула, концентрация, расстояние зондирования, длина волны лазерного излучения

Введение

Загрязнение атмосферы молекулами оксидов азота, серы и углерода представляет большую проблему в связи с их широким распространением в большом числе технологий современных производств [1]. Разработка новых лазерных методов измерения концентрации молекул оксидов с уровнем концентраций порядка предельно-допустимой (ПДК) [1, 2] и выше в атмосфере на базе лидара комбинационного рассеяния света требует выбора оптической схемы и оптимальных параметров такого лидара. Ранее, в работах [1, 3–6] в результате анализа методов лазерного зондирования газовых молекул атмосфере было получено, что лидар комбинационного рассеяния света может использоваться для дистанционного измерения концентрации молекул на уровне десятков и сотен ПДК. А в работах [4, 7, 8] было предложено лидарное уравнение для комбинационного рассеяния света газовыми молекулами в атмосфере с учётом конечной ширины линии генерации. Оказалось, что учёт конечной ширины линии генерации реального лазера, соотношение ширин полос комбинационного рассеяния света и аппаратной функции лидара позволяет уточнить решение такого лидарного уравнения [7, 8]. Поэтому целью настоящей работы является оценка возможности измерений таким лидаром комбинационного рассеяния света концентрации молекул оксидов на уровне ПДК и выше в атмосфере на расстояниях зондирования до 500 м в режиме синхронного счёта фотонов и выбор оптимальных параметров такого лидара.

1. Лидар комбинационного рассеяния света

Оптическая схема такого варианта лидара комбинационного рассеяния света построена по биаксиальной схеме как и в [1, 3, 4] и приведена на рис. 1. В качестве зондирующего излучения используется излучение третьей и второй гармоники YAG Nd-лазера с накачкой полупроводниковым лазером с длинами волн 355 и 532 нм и полупроводникового лазера с длиной волны 650 нм с длительностью импульсов 10 нс и энергиями в импульсе до 10 мкДж при частоте следования лазерных импульсов f до 100 кГц [9, 10]. Излучение лазера I направлялось

параллельно оси приёмного телескопа на расстоянии 250 мм, как и в [1, 10], а излучение комбинационного рассеяния молекулами оксидов в атмосфере в направлении назад собиралось приёмным телескопом типа Ньютона со сферическим зеркалом 9 диаметром 400 мм и фокусировалось линзовым объективом 8 в волоконный ввод 6 микроспектрометра 7 типа FSD-8, работающего на линии с ПК.

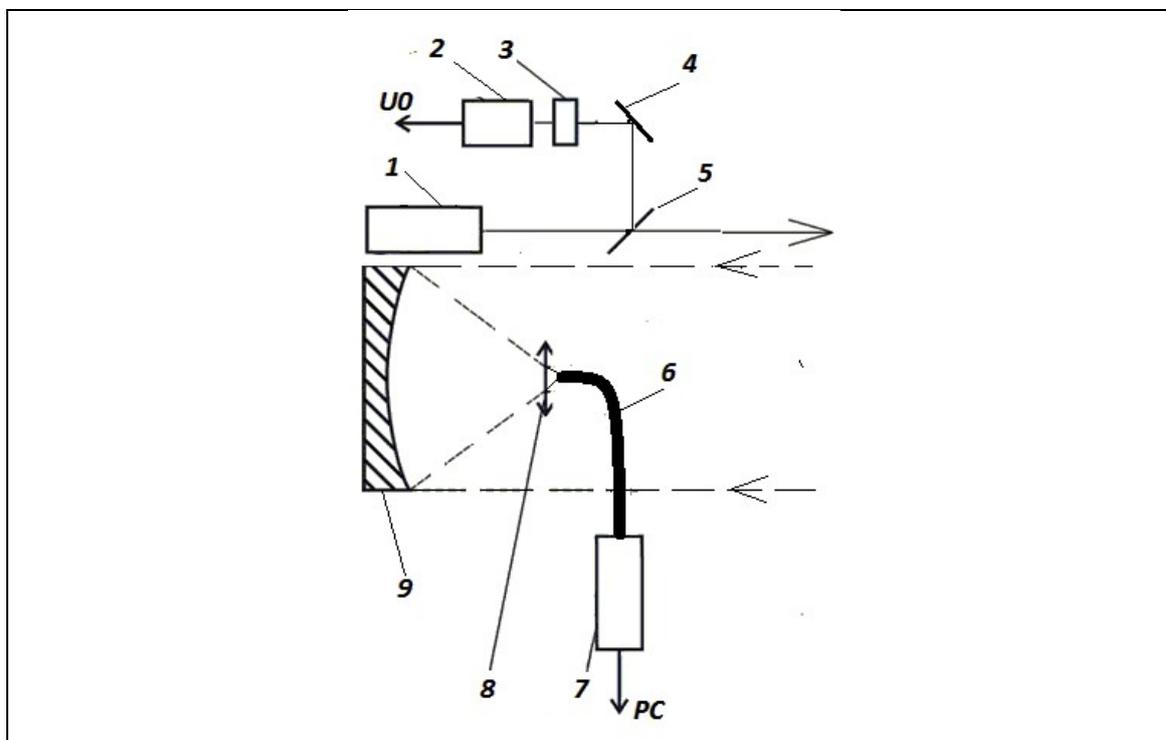


Рис. 1. Оптическая схема лидара комбинационного рассеяния света: 1 – лазер; 2 – фотоприёмник; 3 – интерференционный светофильтр; 4 – глухое зеркало; 5 – стеклянная пластина; 6 – волоконный ввод; 7 – микро спектрометр; 8 – линзовый объектив. 9 – сферическое зеркало приёмного телескопа

Часть лазерного излучения направлялась стеклянной пластиной 5 и глухим зеркалом 4 через интерференционный светофильтр 3 на фотоприёмник 2, напряжение U_0 с которого записывалось платой сбора данных в ПК, для контроля энергии лазерного импульса и формирования начала отсчёта времени измерения.

2. Лидарное уравнение для комбинационного рассеяния света

Лазер лидара будем характеризовать числом фотонов n_0 в импульсе посылаемого в атмосферу лазерного излучения длительностью τ_0 , а линию генерации лазера будем считать Гауссовой с максимумом на частоте ν_0 и полушириной Γ_0 . Тогда число фотонов $n(\nu, z)$ излучения комбинационного рассеяния света исследуемыми молекулами оксидов с концентрацией $N(z)$ на фотоприёмнике лидара можно получить из лидарного уравнения в направлении назад в режиме счёта фотонов в виде [4, 7] как интеграл в интервале от $(\nu_0 - \Gamma_0)$ до $(\nu_R - \Gamma_R)$ [7]:

$$n(\nu, z) = n_0 c \tau_1 G(z) f t S_0 N(z) \frac{d\sigma}{d\Omega} \int_{\nu_0 - \Gamma_0}^{\nu_R + \Gamma_R} T_0(\nu_0, z) \cdot T(\nu_R, z) \cdot \Phi(\nu) A(\nu) \frac{d\nu}{2z^2} \quad (1)$$

где $n(\nu, z)$ – число фотонов, зарегистрированное фотоприёмником лидара на частоте ν_R комбинационного рассеяния света с расстояния зондирования z ; n_0 – число фотонов на частоте ν_0 лазерного излучения. Кроме того, обозначены S_0 – площадь приёмной апертуры телескопа; $G(z)$ – геометрическая функция лидара [1, 7, 10]. Эта функция определяется параметрами оптической схемы лидара [10] и лежит в пределах $0 < G(z) < 1$. Следующие величины: $N(z)$ – концентрация исследуемых молекул; t – время измерения или накопления сигнала и $(d\sigma/d\Omega)$ – дифференциальное сечение комбинационного рассеяния света исследуемыми молекулами. А два множителя –

пропускание атмосферы – как и в [1, 10] равны $T_0(\nu_0, z) = \exp\left[-\int_0^z \alpha(\nu_0, r) dr\right]$ и

$T(\nu_R, z) = \exp\left[-\int_0^z \alpha(\nu_R, r) dr\right]$, соответственно, где $\alpha(\nu_0, r)$ и $\alpha(\nu_R, r)$ – коэффициенты ослабления на

частотах лазерного излучения и комбинационного рассеяния света молекулами оксидов. Учитывая эти выражения, предположим, что функция распределения фотонов лазерного излучения в линии генерации $\Phi(\nu)$ в нашем случае гауссова [7–9]. Кроме того, будем считать, что аппаратная функция или спектральный коэффициент пропускания приёмной системы лидара $A(\nu)$ [1, 8, 10] так же имеет гауссову форму и настроена точно на частоту ν_R полосы комбинационного рассеяния света молекулами оксидов с полушириной Γ_a , которая больше чем Γ_R и Γ_0 , K_l – лидарная константа на частоте ν_0 лазерного излучения, измеренная экспериментально в [11], а $\xi(\nu_R)$ – относительная спектральная чувствительность фотоприёмника на частоте ν_R излучения комбинационного рассеяния света. Тогда перепишем уравнение (1) в виде

$$n(\nu, z) = \frac{B}{z^2} N(z) t I(\nu, z) \quad (2)$$

в этом выражении обозначена константа B как

$$B = \frac{c \tau_1}{2} S_0 f \quad (3)$$

и функция $I(\nu, z)$, которую, используя интеграл ошибок [7, 8], можно представить в виде

$$I(\nu, z) = G(z) n_0 \frac{d\sigma}{d\Omega} 0.34 K_l \xi(\nu) T_0(\nu_0, z) \cdot T(\nu_R, z), \quad (4)$$

при условии, что $\Phi(\nu) = 1$, когда полуширина линии генерации много меньше, чем полуширина аппаратной функции лидара. Также считаем, что дифференциальное сечение комбинационного рассеяния света можно считать постоянным внутри интервала интегрирования по частоте, как и коэффициенты ослабления на частотах лазерного излучения и комбинационного рассеяния света молекулами оксидов [12].

$$t = \frac{n(\nu, z) z^2}{B I(\nu, z) N(z)}. \quad (5)$$

Далее будем рассматривать однократное комбинационное рассеяние света и однородную атмосферу [1, 10, 12]. Значения максимумов полос валентных NO, SO и CO колебаний молекул оксидов собраны из [1, 10, 11, 13, 14] в табл. 1 и для этих полос валентных колебаний всех молекул значения дифференциального сечения колебательного комбинационного рассеяния света на длине волны лазерного излучения 337,1 нм взяты из [12, 13].

Таблица 1

Параметры молекул оксидов азота, серы и углерода

| Наименование ЗВ | ПДК*, мг/м ³ | ПДК, м ⁻³ | Частота собственных колебаний молекул, $\tilde{\nu}^{**}$, см ⁻¹ | Дифференциальное сечение колебатель- ного КРС молекул, ($d\sigma/d\Omega$)·10 ³⁰ см ² *** |
|---|----------------------------|-------------------------|---|--|
| Оксид азота (NO) | 0,4 | 8·10 ¹⁸ | 1877 | 1,5 |
| Диоксид азота (NO ₂) | 0,2 | 2,6·10 ¹⁸ | 1320 | 51 |
| Диоксид серы (SO ₂) | 0,5 | 4,7·10 ¹⁸ | 1151,5 | 17,0 |
| Оксид углерода (CO) | 5,0 | 107,5 10 ¹⁸ | 2145 | 3,6 |
| Диоксид углерода (CO ₂) | - | - | 1388 | 4,2 |
| * ПДК (максимально разовые) взяты из [2] | | | | |
| ** Значения частот собственных колебаний молекул взяты из [1, 10] | | | | |
| *** Значения дифференциальных сечений колебательного комбинационного рассеяния света молекул взяты из [10, 13] | | | | |

Значения дифференциальных сечений комбинационного рассеяния света для всех молекул ($d\sigma/d\Omega$) и выбранных длин волн лазерного излучения 355, 532 и 650 нм были определены по данным, экспериментально измеренным в [10, 13] при комнатной температуре и нормальном давлении на длине волны излучения азотного лазера 337 нм и рассчитанные с учётом зависимости $1/\lambda^4$ для интересующих нас длин волн [11]. Все эти значения приведены в табл. 2.

Таблица 2

Длины волн и частоты лазерного излучения и полос комбинационного рассеяния света молекул оксидов, дифференциальные сечения колебательного комбинационного рассеяния света (КРС) для этих полос, коэффициенты ослабления в атмосфере на этих длинах волн и относительная спектральная чувствительность фотоприёмника

| Длина волны, λ , нм | Частота, ν , ГГц | Дифференциальное сечение КРС ($d\sigma/d\Omega$) 10^{30} см^2 | Коэффициент ослабления $\alpha(\nu_0, r)$, км^{-1} | Коэффициент ослабления $\alpha(\nu_R, r)$, км^{-1} | Относительная спектральная чувствительность фотоприёмника $\xi(\nu)$ |
|-------------------------------------|----------------------|---|--|--|--|
| Оксид азота (NO) | | $\nu = 1877 \text{ см}^{-1}$ | | ПДК = 0.4 мг/м^3 ($8 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$) | |
| 355 | 845,1 | 1,2 | 0,31 | | |
| 370,6 | 809,5 | | | 0,29 | 0,3 |
| 532 | 563,9 | 0,3 | 0,16 | | |
| 567,9 | 528,3 | | | 0,25 | 0,96 |
| 650 | 461,5 | 0,1 | 0,14 | | |
| 704,3 | 426,0 | | | 0,24 | 0,83 |
| 337 | 890,2 | 1,5 | | | |
| Диоксид азота (NO ₂) | | $\nu = 1320 \text{ см}^{-1}$ | | ПДК = 0.2 мг/м^3 ($2.6 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$) | |
| 355 | 845,1 | 41,5 | 0,31 | | |
| 372,5 | 805,4 | | | 0,28 | 0,35 |
| 532 | 563,9 | 10,1 | 0,16 | | |
| 572,2 | 524,3 | | | 0,15 | 0,97 |
| 650 | 461,5 | 3,7 | 0,14 | | |
| 711,0 | 421,9 | | | 0,13 | 0,76 |
| 337 | 890,2 | 51,0 | | | |
| Диоксид серы (SO ₂) | | $\nu = 1151,5 \text{ см}^{-1}$ | | ПДК = 0,5 мг/м^3 ($4,7 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$) | |
| 355 | 845,1 | 13,8 | 0,31 | | |
| 370,1 | 819,6 | | | 0,28 | 0,3 |
| 532 | 563,9 | 2,7 | 0,16 | | |
| 566,7 | 529,4 | | | 0,15 | 0,85 |
| 650 | 461,5 | 1,2 | 0,14 | | |
| 702,6 | 427,0 | | | 0,13 | 0,83 |
| 337 | 890,2 | 17,0 | | | |
| Оксид углерода (CO) | | $\nu = 2145 \text{ см}^{-1}$ | | ПДК = 5,0 мг/м^3 ($107,5 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$) | |
| 355 | 845,1 | 2,9 | 0,31 | | |
| 384,3 | 780,6 | | | 0,25 | 0,36 |
| 532 | 563,9 | 0,6 | 0,16 | | |
| 626,7 | 478,7 | | | 0,15 | 1,00 |
| 650 | 461,5 | 0,3 | 0,14 | | |
| 755,3 | 397,2 | | | 0,13 | 0,68 |
| 337 | 890,2 | 3,6 | | | |
| Диоксид углерода (CO ₂) | | $\nu = 1388 \text{ см}^{-1}$ | | | |
| 355 | 845,1 | 3,4 | 0,316 | | |
| 373,4 | 803,4 | | | 0,28 | 0,38 |
| 532 | 563,9 | 0,7 | 0,16 | | |
| 573,4 | 523,2 | | | 0,14 | 0,98 |

| | | | | | |
|-------|-------|-----|------|------|------|
| 650 | 461,5 | 0,3 | 0,14 | | |
| 714,5 | 419,9 | | | 0,13 | 0,78 |
| 337 | 890,2 | 4,2 | | | |

Значения коэффициентов ослабления для этих частот $\alpha(v_0, z)$ и $\alpha(v, z)$ из [15] также собраны в табл. 2. Поперечное сечение зеркала приемного телескопа лидара было 0.12 м^2 . а шаг по расстоянию $-7,5 \text{ м}$ для времени одного измерения 50 нс , за которое может быть зарегистрировано 200 фотонов [9].

3. Решение лидарного уравнения и обсуждение результатов

Рассмотрим численное решение уравнения (5), полагая, что $G(z)$ в нашем случае равно 1, и концентрация молекул диоксида азота равна $N(z) = 10^{18} \text{ м}^{-3}$. Для такого случая выполним решение уравнения (5) для трёх значений длин волн лазерного излучения 355, 532 и 650 нм с частотой следования лазерных импульсов 100 кГц, энергии в импульсе 1 мДж и диапазона расстояния зондирования от 50 м до 500 м. Результаты решения уравнения (5) для этого случая представлены на рис. 2, как зависимость времени измерения t для нашей экспериментальной ситуации от расстояния зондирования z .

На графиках рис. 2 видно увеличение времени измерения t в ряду длин волн лазерного излучения 532–355–650 нм за счёт спектральной зависимости величин, входящих в уравнение (5), при этом величина времени измерения резко нарастает за первые 200 м примерно на порядок.

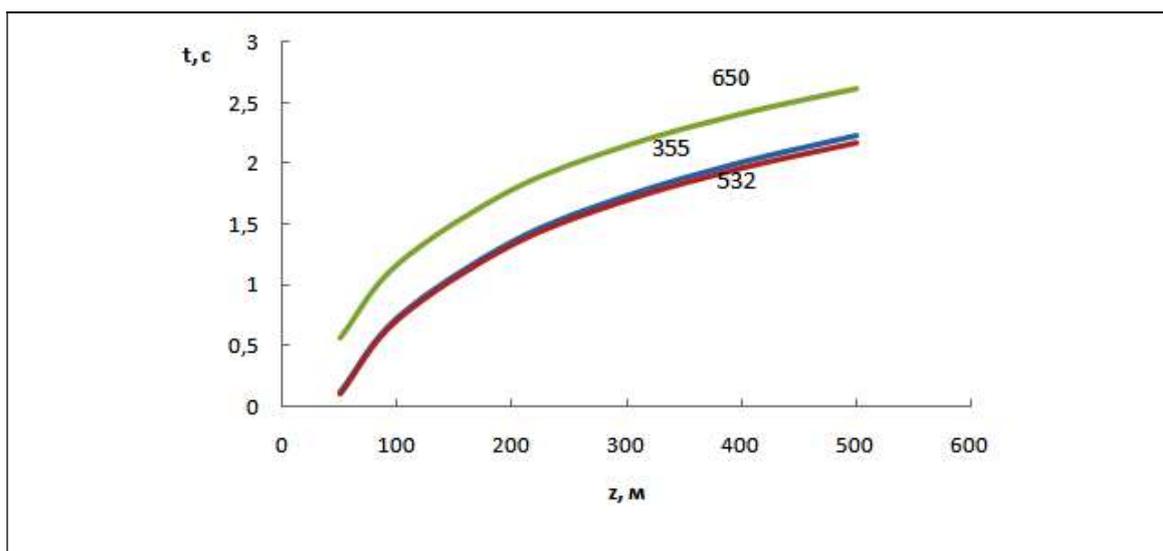


Рис.2. Графики рассчитанной по уравнению (5) зависимости времени измерения t для молекул диоксида азота в логарифмическом масштабе от расстояния зондирования z для длин волн лазерного излучения 532, 355 и 650 нм при зондировании атмосферы лидаром комбинационного рассеяния света. Числа у линий показывают длину волны лазерного излучения

Далее рассмотрим численное решение уравнения (5) для диапазона концентрации молекул диоксида азота $N(z) 10^{16} \dots 10^{20} \text{ м}^{-3}$. Для этого выполним решение уравнения (5) для длины волн лазерного излучения 532 нм как наилучший вариант по данным рис. 2. Результаты решения уравнения (5) представлены на рис. 3.

Как показывает зависимость времени измерения t для нашей экспериментальной ситуации от концентрации молекул диоксида азота $N(z)$, оно убывает обратно пропорционально концентрации, как и следует из уравнения (5), и растёт примерно на порядок с увеличением расстояния зондирования z .

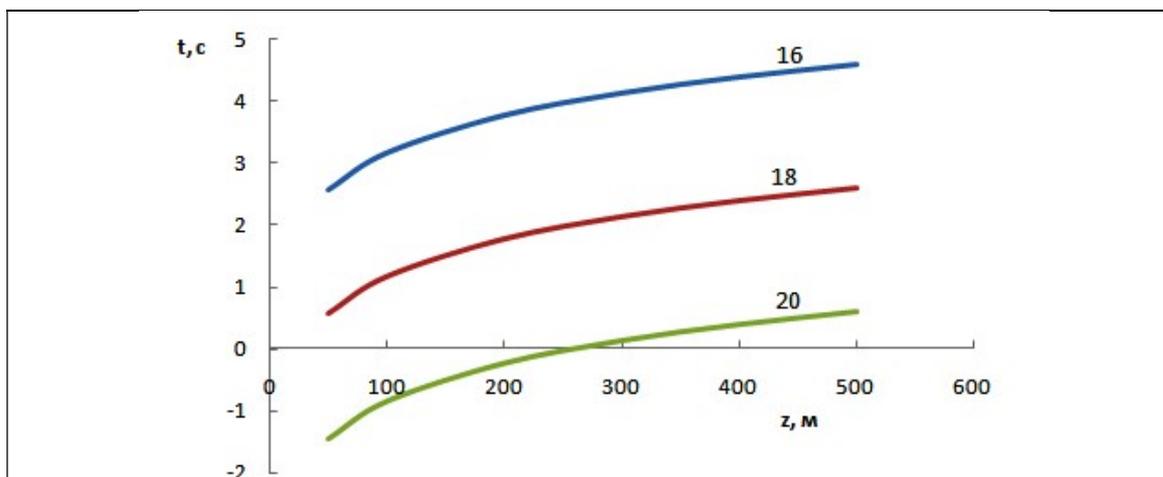


Рис. 3. Графики рассчитанной по уравнению (5) зависимости времени измерения t для молекул диоксида азота в логарифмическом масштабе от расстояния зондирования z для длины волны лазерного излучения 532 нм для той же экспериментальной ситуации. Числа у линий обозначают показатель степени значения концентрации молекул диоксида азота $N(z) 10^{16}, 10^{18}, 10^{20} \text{ м}^{-3}$

Более наглядно эта зависимость для молекулы СО представлена на рис. 4 для расстояний зондирования 50, 100 и 200 м. Логарифмические зависимости времени измерения t от концентрации $N(z)$ показывают, что диапазон значений времени измерения для концентраций порядка ПДК для 50 м составляет 21,5 с, а для 200 м – уже 360 с.

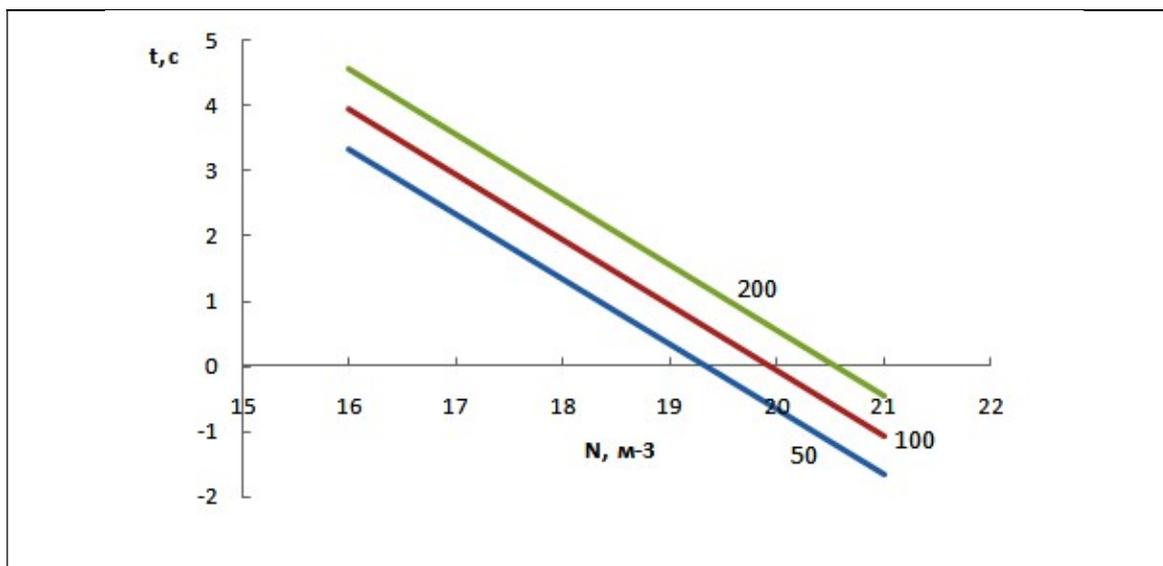


Рис. 4. Графики рассчитанной по уравнению (5) зависимости времени измерения t для молекул диоксида азота в логарифмическом масштабе от расстояния зондирования z для длины волны лазерного излучения 532 нм для той же экспериментальной ситуации. Числа у линий показывают расстояния зондирования 50, 100, 200 м

Теперь оценим время измерения t для всех молекул оксидов с концентрацией порядка ПДК (рис. 5). Для молекулы CO_2 ПДК не определено, а для молекулы СО на два порядка больше чем у остальных трех молекул. Поэтому сведём их к величине концентрации $N(z) = 10^{18} \text{ м}^{-3}$. Это значит, что для оксидов углерода реальная концентрация будет на два порядка больше, а время измерения примерно на два порядка меньше – 0,2 с на 50 м, тогда как для NO_2 – 3,6 с, SO_2 – 5,4 с и NO – 43,7 с на том же расстоянии зондирования 50 м.

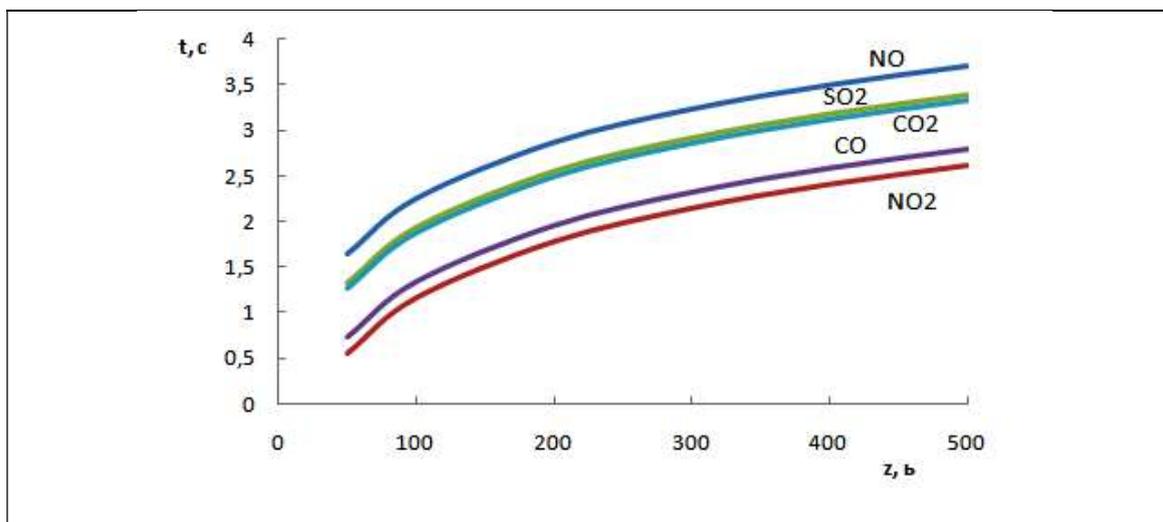


Рис. 4. Графики рассчитанной по уравнению (5) зависимости времени измерения t для всех молекул оксидов в логарифмическом масштабе от расстояния зондирования z для длины волны лазерного излучения 532 нм для той же экспериментальной ситуации

Это связано со спектральной зависимостью дифференциальных сечений колебательного комбинационного рассеяния света для полос этих молекул, коэффициентов ослабления в атмосфере на этих длинах волн и относительной спектральной чувствительности фотоприёмника. Всюду в расчётах частота следования лазерных импульсов составляла 100 кГц и время одного измерения 50 нс или шага по расстоянию $\Delta z = 7,5$ м. Очевидно, что дальнейшее уменьшение величины концентрации исследуемых молекул возможно за счёт увеличения времени измерения t и частоты следования лазерных импульсов f или увеличения их энергии E_0 .

Заключение

Таким образом, полученные результаты позволяют выбрать оптимальные параметры лазера и лидара комбинационного рассеяния света для зондирования молекул оксидов в атмосфере на расстояниях зондирования до 500 м. Причём, если диоксид азота с концентрацией порядка ПДК можно зондировать во всем диапазоне расстояний за времена до 50 с то оксид азота только за время измерения 5000 с. Чтобы зондировать оксиды углерода с концентрацией на уровне ПДК достаточно времени измерения порядка 21 с для CO_2 и до 25 с – для CO одинаковой концентрации, равной ПДК CO, что возможно реализовать в одном лидаре в конкретных экспериментальных условиях [1, 4, 16]. А поэтому, подбирая время измерения, можно увеличить расстояние зондирования концентраций молекул оксидов порядка ПДК для того же варианта лидара комбинационного рассеяния света.

Конфликт интересов

Автор статьи заявляет, что у него нет конфликта интересов по материалам данной статьи с третьими лицами, на момент подачи статьи в редакцию журнала, и ему ничего не известно о возможных конфликтах интересов в настоящем со стороны третьих лиц.

Благодарности

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ, проекты № 19-42-230004 и № 19-45-230009.

Список литературы

1. Привалов В. Е., Фотиади А. Э., Шеманин В. Г. Лазеры и экологический мониторинг атмосферы. СПб.: Лань, 2013. 288 с.
2. Гигиенические нормативы ГН 2.1.6.3492-17 (с изменениями на 31 мая 2018 года). Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений. 51 с.
3. Privalov V. E., Shemanin V. G. Hydrogen Sulfide Molecules Lidar Sensing in the Atmosphere // Optical Memory and Neural Networks. 2018. V. 27(2). P. 120–131. DOI: 10.3103/S1060992X18020091
4. Privalov V. E., Shemanin V. G. Accuracy of lidar measurements of the concentration of hydrofluoride molecules in the atmospheric boundary layer // Measurement Techniques. 2020. V. 63. No. 7. P. 543–548. DOI 10.1007/s11018-020-01821-0
5. Самохвалов И. В., Копытин Ю. Д., Ипполитов И. И. и др. Лазерное зондирование тропосферы и подстилающей поверхности. Новосибирск: Наука, 1987. 262 с.
6. Зуев В. Е., Зуев В. В. Дистанционное оптическое зондирование атмосферы. СПб: Гидрометеоиздат, 1992. 231 с.
7. Привалов В. Е., Шеманин В. Г. Лидарное уравнение с учётом конечной ширины лазерной линии // Известия РАН. Серия Физическая. 2015. Т. 79. № 2. С. 170–180
8. Привалов В. Е., Шеманин В. Г. Учёт ширины линии лазерного излучения в лидарном уравнении для комбинационного рассеяния света // Оптический журнал. 2015. Т. 82. № 9. С. 11–15
9. Глазов Г. Н. Статистические вопросы лидарного зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1987. 308 с.
10. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.
11. Привалов В. Е., Шеманин В. Г. Параметры лидаров для дистанционного зондирования газовых молекул и аэрозоля в атмосфере. СПб.: Балт. ГТУ, 2001. 56 с.
12. Донченко В. А., Кабанов М. В., Кауль Б. В., Самохвалов И. В. Атмосферная электрооптика. Томск: Изд. НТЛ, 2010. 220 с.
13. Лазерный контроль атмосферы. Под ред. Э. Д. Хинкли. М.: Мир, 1979. 416 с.
14. Свердлов Л. М., Ковнер М. А., Крайнов Е. П. Колебательные спектры многоатомных молекул. М.: Наука, 1970. 560 с.
15. Справочник по лазерам. Под ред. А. М. Прохорова Т. I. М.: Советское Радио, 1978. 591 с.
16. Dyachenko V. V., Chertiy P. V., Shemanin V. G. Laser Systems for the Pollutants Control in the Oil and Gas Industry // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. V. 272. P. 032003. IOP Publishing doi: 10.1088/1755-1315/272/3/032003.

Raman lidar for probing oxide molecules in the atmosphere

Shemanin V. G.

*Novorossiysk Branch of Belgorod V G Shukhov State Technology University, 353919, Russia,
Novorossiysk, Myskhakskoe shosse 75*

email: shemanin-v-g@nb-bstu.ru

A numerical solution of the lidar equation for measuring the concentration of molecules of nitrogen, sulfur and carbon oxides at the MPC level and above (in the range from $2.6 \cdot 10^{18}$ to $1.1 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$) by a Raman lidar in the atmosphere at a sensing distance of up to 500 m in the mode of synchronous photon counting and selection of the optimal parameters of this lidar variant. It has been shown that when a lidar probes the Raman scattering of light of all studied molecules in the atmosphere using laser radiation at a wavelength of 532 nm, it is possible to register the concentration at the MPC level for sulfur dioxide during a measurement time of 616 s at a sensing distance of up to 500 m, for carbon dioxide and carbon monoxide 21 and 25 s, respectively, at the same distance, for nitrogen dioxide – in the entire range of distances for times up to 50 s, and for nitrogen oxide only for a measurement time of up to 5000 s.

Keywords: Raman lidar, molecule, concentration, sensing distance, laser wavelength

Funding

This work was carried out with partial financial support from the RFBR grants, projects No. 19-42-230004 and No. 19-45-230009.

References

1. Privalov V. E., Fotiadi A. E., Shemanin V. G. Lasers and environmental monitoring of the atmosphere. SPb.: Lan, 2013. 288 p. (in Russian).
2. Hygienic standards HS 2.1.6.3492-17 (as amended on May 31, 2018). Maximum permissible concentration (MPC) of pollutants in the air of urban and rural settlements. 51 p. (in Russian).
3. Privalov V. E., Shemanin V. G. Hydrogen Sulfide Molecules Lidar Sensing in the Atmosphere // Optical Memory and Neural Networks. 2018. V. 27(2). P. 120–131. DOI: 10.3103/S1060992X18020091.
4. Privalov V. E., Shemanin V. G. Accuracy of lidar measurements of the concentration of hydrofluoride molecules in the atmospheric boundary layer // Measurement Techniques. 2020. V. 63. No. 7. P. 543–548. DOI 10.1007/s11018-020-01821-0.
5. Samokhvalov I. V., Kopytin Yu. D., Ippolitov I. I. and others. Laser sounding of the troposphere and underlying surface. Novosibirsk: Nauka, 1987. 262 p. (in Russian).
6. Zuev V. E., Zuev V. V. Remote optical sensing of the atmosphere. SPb: Gidrometeoizdat, 1992. 231 p. (in Russian).
7. Privalov V. E., Shemanin V. G. Lidar equation taking into account the finite width of the laser line // Izvestiya RAN. Seriya Fizicheskaya. 2015. V. 79. N 2. P. 170–180 (in Russian).
8. Privalov V. E., Shemanin V. G. Taking into account the linewidth of laser radiation in the lidar equation for Raman scattering of light // Optical Journal. 2015. V. 82. N 9. P. 11–15 (in Russian).
9. Glazov G. N. Statistical issues of lidar sensing of the atmosphere. Novosibirsk: Nauka, 1987. 308 p. (in Russian).
10. Mezheris R. Laser remote sensing. Moscow: Mir, 1987. 550 p. (in Russian).
11. Privalov V. E., Shemanin V. G. Lidar parameters for remote sensing of gas molecules and aerosols in the atmosphere. SPb.: Balt. GTU, 2001. 56 p. (in Russian).
12. Donchenko V. A., Kabanov M. V., Kaul B. V., Samokhvalov I. V. Atmospheric electrooptics. Tomsk: NTL, 2010. 220 p. (in Russian).
13. Laser control of the atmosphere. Ed. E. D. Hinkli. Moscow: Mir, 1979. 416 p. (in Russian).
14. Sverdlov L. M., Kovner M. A., Kraynov E. P. Vibrational spectra of polyatomic molecules. Moscow: Nauka, 1970. 560 p. (in Russian).
15. Laser Handbook. Ed. A. M. Prokhorov V. I. Moscow: Sovetskoe Radio, 1978. 591 p. (in Russian).
16. Dyachenko V. V., Chertiy P. V., Shemanin V. G. Laser Systems for the Pollutants Control in the Oil and Gas Industry // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. V. 272. P. 032003. IOP Publishing doi: 10.1088/1755-1315/272/3/032003.