

УДК 535.621(075.8)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИДАРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИИ МОЛЕКУЛ ГАЛОИДОВОДОРОДОВ В АТМОСФЕРЕ МЕТОДОМ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА

**В. Е. ПРИВАЛОВ<sup>1)</sup>, В. Г. ШЕМАНИН<sup>2), 3)</sup>, В. В. ДЬЯЧЕНКО<sup>3)</sup>**

<sup>1)</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
ул. Политехническая, 29, 195251, г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>2)</sup>Филиал Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова  
в г. Новороссийске, ул. Мысхакское шоссе, 75, 353919, г. Новороссийск, Россия

<sup>3)</sup>Новороссийский политехнический институт (филиал)  
Кубанского государственного технологического университета,  
ул. Карла Маркса, 20, 353900, г. Новороссийск, Россия

Выполнено компьютерное моделирование лидара комбинационного рассеяния света для дистанционного измерения содержания молекул галоидоводородов на уровне предельно допустимой концентрации и выше, и определены оптимальные параметры такого лидара. С использованием предложенного ранее варианта лидарного уравнения для комбинационного рассеяния света оценена возможность лидарных измерений концентрации исследуемых молекул на заданном уровне в атмосферном пограничном слое при горизонтальном зондировании на расстоянии до 1500 м в режиме синхронного счета фотонов. В этом уравнении учтены конечная ширина лазерной линии и аппаратная функция лидара комбинационного рассеяния света при зондировании молекул галоидоводородов в атмосферном пограничном слое, а также спектральная зависимость дифференциальных сечений полос колебательного комбинационного рассеяния света данными молекулами, коэффициентов ослабления лазерного излучения в атмосфере и спектральная чувствительность фотоприемника. Установлено, что предложенный лидар комбинационного рассеяния света позволяет измерить содержание молекул галоидоводородов на уровне предельно допустимой концентрации на расстоянии до 89 м (для бромоводорода), 277 м (для фтороводорода) и почти 1486 м (для хлороводорода).

**Ключевые слова:** лидар комбинационного рассеяния света; лазерное излучение; молекулы галоидоводородов; расстояние зондирования; время измерения.

**Благодарность.** Работа выполнена при финансовой поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 19-42-230004 и 19-45-230009).

### Образец цитирования:

Привалов ВЕ, Шеманин ВГ, Дьяченко ВВ. Моделирование лидарных измерений концентрации молекул галоидоводородов в атмосфере методом комбинационного рассеяния света. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика.* 2024;1:16–25.  
EDN: JZSPAИ

### For citation:

Privalov VE, Shemanin VG, Dyachenko VV. Simulation of lidar measurements of the concentration of hydrogen halide molecules in the atmosphere using the Raman method. *Journal of the Belarusian State University. Physics.* 2024;1:16–25. Russian.  
EDN: JZSPAИ

### Авторы:

**Вадим Евгеньевич Привалов** – доктор физико-математических наук, профессор; профессор кафедры физики Физико-механического института.

**Валерий Геннадьевич Шеманин** – доктор физико-математических наук; профессор кафедры технических дисциплин<sup>2)</sup>, главный научный сотрудник кафедры инженерных дисциплин и управления<sup>3)</sup>.

**Владимир Викторович Дьяченко** – доктор географических наук; профессор кафедры инженерных дисциплин и управления.

### Authors:

**Vadim E. Privalov**, doctor of science (physics and mathematics), full professor; professor at the department of physics, Institute of Physics and Mechanics.

vaevpriv@yandex.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-2904-7382>

**Valery G. Shemanin**, doctor of science (physics and mathematics); professor at the department of technical sciences<sup>b</sup> and chief researcher at the department of engineering sciences and management<sup>c</sup>.

vshemanin@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-0707-489X>

**Vladimir V. Dyachenko**, doctor of science (geography); professor at the department of engineering sciences and management.  
v-v-d@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0479-2909>

## SIMULATION OF LIDAR MEASUREMENTS OF THE CONCENTRATION OF HYDROGEN HALIDE MOLECULES IN THE ATMOSPHERE USING THE RAMAN METHOD

V. E. PRIVALOV<sup>a</sup>, V. G. SHEMANIN<sup>b, c</sup>, V. V. DYACHENKO<sup>c</sup><sup>a</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,  
29 Politekhnicheskaya Street, Saint Petersburg 195251, Russia<sup>b</sup>Branch of the Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov in Novorossiysk,  
75 Myskhakskoe shosse Street, Novorossiysk 353919, Russia<sup>c</sup>Novorossiysk Polytechnic Institute (branch), Kuban State Technological University,  
20 Karla Marksa Street, Novorossiysk 353900, Russia

Corresponding author: V. G. Shemanin (vshemanin@mail.ru)

Computer simulation of the Raman lidar for remote measurement of the hydrogen halide molecules concentration at the maximum permissible concentration level and above was performed and the optimal parameters of such lidar were determined. Using the previously proposed variant of the Raman lidar equation its parameters estimation were made for lidar measurements of the studied molecules of concentration at a given level in the atmospheric boundary layer during horizontal ranging at the distance up to 1500 m in the synchronous photon counting mode. This equation takes into account the finite width of the laser line and the hardware function of the Raman lidar, as well as the spectral dependence of the vibrational Raman differential cross sections of hydrogen halide molecules, the extinction coefficients of the laser radiation in the atmosphere and the photodetector spectral sensitivity. It was found that the proposed Raman lidar can measure the concentration of hydrogen halide molecules at the maximum permissible concentration level at the distance up to 89 m (for hydrogen bromide), 277 m (for hydrogen fluoride) and almost 1486 m (for hydrogen chloride).

**Keywords:** Raman lidar; laser radiation; hydrogen halide molecules; ranging distance; measurement time.

**Acknowledgements.** This work was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research grants (projects 19-42-230004 and 19-45-230009).

## Введение

Галоидоводороды – фтороводород (HF), хлороводород (HCl) и бромоводород (HBr) – неорганические вещества, в состав которых входит водород<sup>1</sup> [1]. Они являются неизменными компонентами газовых выбросов, загрязняющих атмосферу на ядерно-химических, газо- и нефтехимических предприятиях. К примеру, хлороводород – это бесцветный газ, дымящий во влажном воздухе. Он легко растворяется в воде (до 500 объемов газа на 1 объем воды), а образующаяся при этом кислота оказывает прижигающее действие на слизистые оболочки и кожу. Так как хлороводород тяжелее воздуха и растворим в воде, он может накапливаться и перемещаться как по поверхности земли, так и по воде. Развитие химии и технологии соединений фтора привело к появлению многочисленных фторсодержащих продуктов. В последнее время фтор стал основой ряда крупномасштабных производств, выпускающих соединения, без которых не обходится ни одна отрасль промышленности. Особенно большие количества фтороводорода выделяются при нанесении на изделия гальванических покрытий (фосфатировании).

Измерение концентрации молекул галоидоводородов проводят газохроматографическим методом или экспресс-методом с использованием индикаторных трубок. Газохроматографический метод достаточно трудоемкий, но с его помощью можно отслеживать загрязнения на уровне предельно допустимых концентраций (ПДК). Метод с применением индикаторных трубок более быстрый, но менее чувствительный. По этой причине интерес представляет оценка потенциальных возможностей системы лазерного дистанционного зондирования атмосферы вокруг источников выбросов с функцией непрерывного мониторинга, корректировки алгоритма работы системы, может, даже с использованием машинного обучения для своевременного обнаружения и отслеживания перемещения облака загрязнения галоидоводородов при аварийных ситуациях.

Одним из вариантов лазерного дистанционного зондирования молекул галоидоводородов в атмосфере может быть лидар комбинационного рассеяния света (КРС) [1–5], обеспечивающий измерение их концентраций на уровне ПДК и выше. Значение ПДК<sup>2</sup> [1] будет использовано в качестве нижней границы концентрации молекул в атмосферном пограничном слое.

<sup>1</sup>ГН 2.1.6.3492-17. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений (с изменениями, утвержденными постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 31.05.2018 г. № 37) / Федер. служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. М. : Федер. центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2019. 55 с.

<sup>2</sup>Там же.

Ранее в работах [3; 6; 7] было предложено лидарное уравнение для КРС газовыми молекулами с учетом конечной ширины лазерной линии. Используя это уравнение и уточнив его решение [6; 7], оценим возможность лидарных измерений концентрации молекул галоидоводородов на заданном уровне в атмосферном пограничном слое при горизонтальном зондировании на расстоянии до 1500 м в режиме синхронного счета фотонов. Уточнить решение лидарного уравнения для измерения концентрации исследуемых молекул позволит учет конечной ширины лазерной линии, соотношения полуширин полос КРС и аппаратной функции лидара.

Целью настоящей работы являются компьютерное моделирование лидара КРС для дистанционного измерения концентрации молекул галоидоводородов на уровне ПДК и выше в атмосферном пограничном слое на расстоянии до 1500 м и определение оптимальных параметров такого лидара.

### Лидар КРС и лидарное уравнение

Оптическая схема лидара КРС (рис. 1) построена, как и в работах [1–3]. В качестве зондирующего излучения используется излучение третьей, второй и первой гармоник YAG: Nd-лазера с длинами волн 355; 532 и 1064 нм, длительностью импульсов  $\tau_0 = 10$  нс и энергией в импульсе 20; 40 и 100 мДж соответственно при частоте следования лазерных импульсов до 10 кГц [8]. Излучение лазера 8 направляется глухим зеркалом 4 вдоль оси приемного телескопа [1; 3], а излучение КРС исследуемыми молекулами в направлении назад собирается приемным телескопом типа Ньютона со сферическим зеркалом 1 диаметром 400 мм и фокусируется линзовым объективом 2 в волоконный ввод 3 микроспектрометра 9 типа FSD-8, работающего на линии с персональным компьютером (ПК).

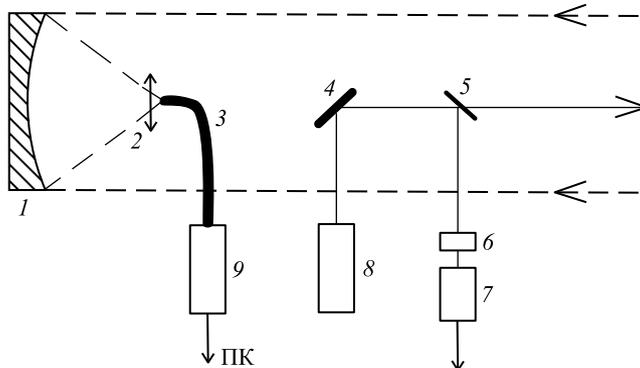


Рис. 1. Оптическая схема лидара КРС:

1 – сферическое зеркало приемного телескопа; 2 – линзовый объектив; 3 – волоконный ввод;  
 4 – глухое зеркало; 5 – стеклянная пластина; 6 – интерференционный светофильтр;  
 7 – фотоприемник; 8 – лазер; 9 – микроспектрометр

Fig. 1. Lidar optical layout:

1 – spherical mirror of the receiving telescope; 2 – lens objective; 3 – fiber input;  
 4 – blind mirror; 5 – glass plate; 6 – interference light filter;  
 7 – photodetector; 8 – laser; 9 – microspectrometer

Часть лазерного излучения направляется стеклянной пластиной 5 через интерференционные светофильтры 6, имеющие максимумы пропускания на длинах волн 355; 532 и 1064 нм, на фотоприемник 7, напряжение с которого записывается платой сбора данных в ПК для контроля энергии лазерного импульса и определения начала отсчета времени измерения.

Число фотонов излучения КРС исследуемыми молекулами на фотоприемнике лидара можно получить из лидарного уравнения для КРС в направлении назад в режиме счета фотонов [3; 6] как интеграл в интервале от  $\nu_R - \Gamma_a$  до  $\nu_R + \Gamma_a$  [6]:

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

где  $n(\nu, z)$  – число фотонов, зарегистрированное фотоприемником лидара на частоте  $\nu_R$  КРС с расстояния зондирования  $z$ ;  $n_0$  – число фотонов на частоте  $\nu_0$  лазерного излучения, а  $\Phi(\nu)$  – их распределение (будем считать его гауссовым распределением с полушириной  $\Gamma_0$ ) [8–10];  $c$  – скорость света;  $\tau_1$  – время одного измерения;  $G(z)$  – геометрическая функция лидара ( $0 < G(z) < 1$ ) [1; 9];  $f$  – частота следования ла-

зерных импульсов;  $t$  – время измерения (накопления сигнала);  $S_0$  – площадь приемной апертуры телескопа;  $N(z)$  – концентрация исследуемых молекул;  $\frac{d\sigma}{d\Omega}$  – дифференциальное сечение КРС исследуемыми молекулами;  $T_0(\nu_0, z)$  и  $T(\nu_R, z)$  – пропускание атмосферы, эти множители определяются выражениями [1; 9]

$$T_0(\nu_0, z) = \exp\left[-\int_0^z \alpha(\nu_0, r) dr\right], \quad T(\nu_R, z) = \exp\left[-\int_0^z \alpha(\nu_R, r) dr\right],$$

здесь  $\alpha(\nu_0, r)$  и  $\alpha(\nu_R, r)$  – коэффициенты ослабления на частотах лазерного излучения и КРС исследуемыми молекулами;  $A(\nu)$  – аппаратная функция (спектральный коэффициент пропускания приемной системы лидара) [3; 5; 9], имеющая лоренцеву форму и настроенная точно на частоту  $\nu_R$  полосы КРС молекулами галоидоводородов с полушириной  $\Gamma_a$ , которая больше, чем  $\Gamma_R$  и  $\Gamma_0$ . Перепишем уравнение (1) в виде

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

В этом выражении введены константа  $B$ , определяемая как

$$B = \frac{c\tau_1}{2} S_0 f,$$

и функция  $I(\nu, z)$ , которая с использованием интеграла ошибок [6; 7] может быть представлена в виде

$$I(\nu, z) = G(z) n_0 \frac{d\sigma}{d\Omega} \cdot 0,34 K_1 \xi(\nu) T_0(\nu_0, z) T(\nu_R, z),$$

где  $K_1$  – лидарная константа на частоте  $\nu_0$  лазерного излучения (измерена экспериментально в работе [11]);  $\xi(\nu)$  – относительная спектральная чувствительность фотоприемника на частоте  $\nu_R$  КРС (взята из справочника [12]).

### Компьютерное моделирование лидарного уравнения

Будем считать, что дифференциальное сечение КРС исследуемыми молекулами постоянно внутри интервала интегрирования по частоте, как и коэффициенты ослабления на частотах лазерного излучения и КРС этими молекулами [13]. В качестве меры эффективности лидара будем использовать время измерения из уравнения (2):

$$t = \frac{n(\nu, z) z^2}{BN(z) I(\nu, z)}. \quad (3)$$

Рассмотрим однократное КРС и однородную атмосферу [1; 9; 13]. Значения ПДК и частоты собственных колебаний молекул  $\tilde{\nu}$  взяты из работ [1; 9; 11; 14]. Значения дифференциальных сечений КРС для всех молекул и выбранных длин волн лазерного излучения (355; 532 и 1064 нм) определены по данным экспериментальных измерений, проведенных при комнатной температуре и нормальном давлении на длине волны 532 нм для водорода [15] и фтороводорода [3] и на длине волны 435,8 нм для хлороводорода [9; 14] и бромоводорода [14]. Расчет выполнен с учетом зависимости  $\frac{1}{\lambda^4}$ , а его результаты собраны в таблицу.

#### Основные параметры моделирования лидарного уравнения

##### The main parameters for the lidar equation simulation

Длина волны, нм	Частота, ГГц	Дифференциальное сечение КРС, $10^{30} \text{ см}^2$	Коэффициент ослабления на частоте лазерного излучения, $\text{км}^{-1}$	Коэффициент ослабления на частоте КРС, $\text{км}^{-1}$	Относительная спектральная чувствительность фотоприемника
Фтороводород ( $\tilde{\nu} = 3959 \text{ см}^{-1}$ ; ПДК = $0,02 \text{ мг/м}^3$ ( $6,02 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$ ))					
355	845	15,03	0,31	–	–
413,1	726	–	–	0,24	0,58
532	564	2,98	0,16	–	–
674	445	–	–	0,15	0,93

Окончание таблицы  
Ending of the table

Длина волны, нм	Частота, ГГц	Дифференциальное сечение КРС, $10^{30} \text{ см}^2$	Коэффициент ослабления на частоте лазерного излучения, $\text{км}^{-1}$	Коэффициент ослабления на частоте КРС, $\text{км}^{-1}$	Относительная спектральная чувствительность фотоприемника
1064	282	0,19	0,12	–	–
1838,4	163	–	–	0,095	0,02
435,8	688	–	–	–	–
Хлороводород ( $\tilde{\nu} = 2886 \text{ см}^{-1}$ ; ПДК = $0,2 \text{ мг/м}^3$ ( $3,07 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$ ))					
355	845	6,15	0,31	–	–
395,5	759	–	–	0,25	0,54
532	564	1,22	0,16	–	–
628,5	477	–	–	0,15	0,98
1064	282	0,08	0,12	–	–
1535,5	195	–	–	0,097	0,05
435,8	688	2,7	–	–	–
Бромоводород ( $\tilde{\nu} = 2560 \text{ см}^{-1}$ ; ПДК = $0,1 \text{ мг/м}^3$ ( $1,23 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$ ))					
355	845	10,00	0,31	–	–
391,9	766	–	–	0,24	0,55
532	564	1,98	0,16	–	–
619,3	484	–	–	0,15	1,00
1064	282	0,12	0,12	–	–
1462,3	205	–	–	0,11	0,05
435,8	688	4,4	–	–	–

Пр и м е ч а н и е. Выделенное курсивом значение дифференциального сечения КРС для фтороводорода взято из статьи [3], для хлороводорода – из работ [9; 14], для бромоводорода – из работы [14].

Приведенные в таблице значения коэффициентов ослабления лазерного излучения в атмосфере для указанных частот взяты из работы [12]. Поперечное сечение зеркала приемного телескопа лидара принято равным  $0,12 \text{ м}^2$ , а шаг по расстоянию выбран равным  $7,5 \text{ м}$ , что соответствует времени одного измерения  $50 \text{ нс}$ , за которое может быть зарегистрировано  $200$  фотонов [10].

### Результаты и их обсуждение

Чтобы оценить возможности предложенного лидара КРС по зондированию молекул HF, HCl и HBr, рассмотрим компьютерное моделирование уравнения (3), полагая, что  $G(z) = 1$ , а концентрация исследуемых молекул  $N(z)$  достигает ПДК, указанных в таблице. Решим уравнение (3) для длин волн лазерного излучения  $355$ ;  $532$  и  $1064 \text{ нм}$  с энергиями в импульсе  $20$ ;  $40$  и  $100 \text{ мДж}$  соответственно и частотой следования лазерных импульсов  $10 \text{ кГц}$  в диапазоне расстояний зондирования от  $5$  до  $1500 \text{ м}$ . В качестве примера для этого случая на рис. 2, а, представлены результаты решения уравнения (3) для молекул хлороводорода с концентрацией  $1,0 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$  как зависимость времени измерения (в логарифмическом масштабе) от расстояния зондирования.

Если ограничить время измерения величиной  $2000 \text{ с}$  ( $\approx 30 \text{ мин}$  (максимальная продолжительность отбора проб загрязняющих веществ при определении разовых концентраций в соответствии с п. 4.1 ГОСТ 17.2.3.01-86<sup>3</sup>)), то диапазон расстояний зондирования уменьшится до  $200 \text{ м}$ . Результаты решения уравнения (3) для молекул хлороводорода с концентрацией  $1,0 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$  в таком случае представлены на рис. 2, б.

<sup>3</sup>ГОСТ 17.2.3.01-86. Охрана природы. Атмосфера. Правила контроля качества воздуха населенных пунктов. Взамен ГОСТ 17.2.3.01-77; введ. 01.01.1987. М.: Стандартиформ, 2005. 4 с.

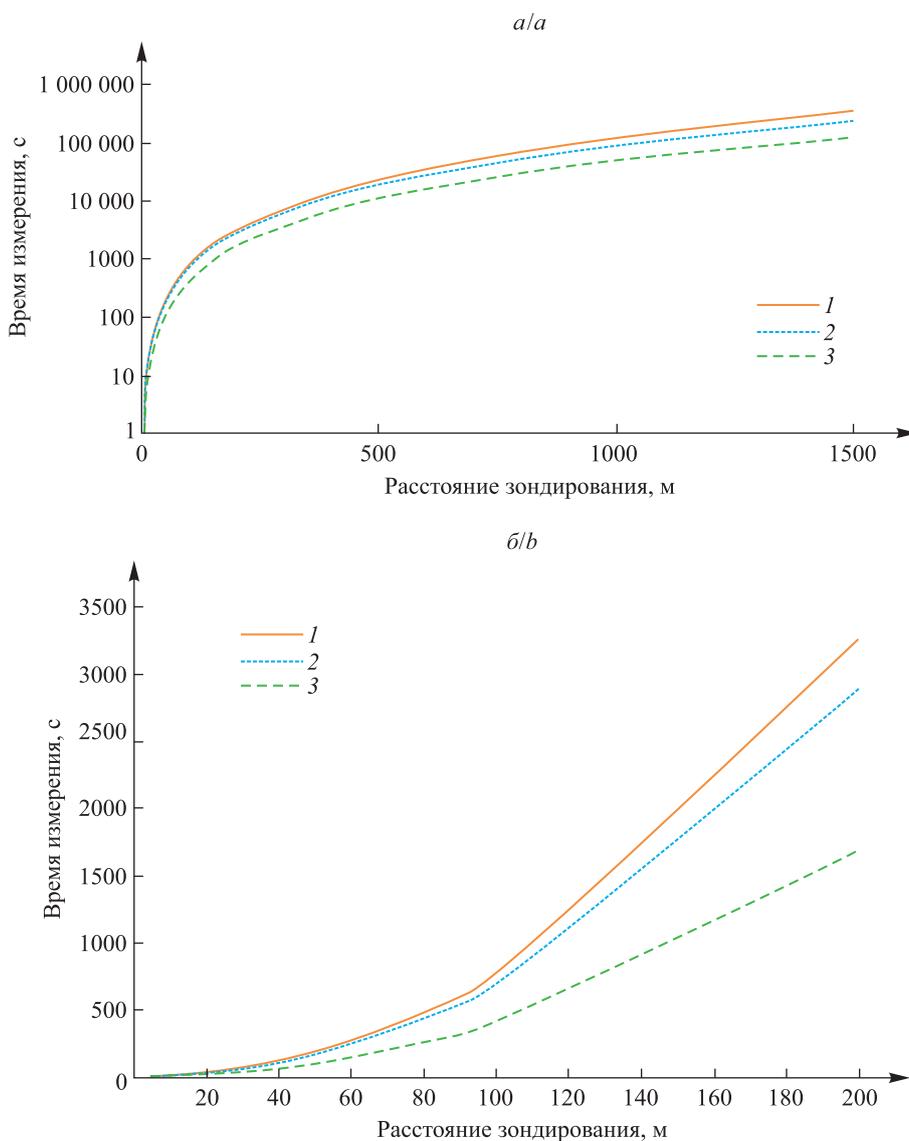


Рис. 2. Графики зависимости времени измерения (в логарифмическом масштабе) от расстояния зондирования в диапазоне до 1500 м (а) и 200 м (б) для молекул хлороводорода с концентрацией  $1,0 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$  в атмосферном пограничном слое при выбранных длинах волн лазерного излучения (1 – 355 нм; 2 – 532 нм; 3 – 1064 нм)

Fig. 2. The plots of the logarithmic dependence of the measurement time on the ranging distance in the range up to 1500 m (a) and 200 m (b) for hydrogen chloride molecules with a concentration of  $1.0 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$  in the atmospheric boundary layer at selected laser radiation wavelengths (1 – 355 nm; 2 – 532 nm; 3 – 1064 nm)

Для сравнения с кривыми, приведенными на рис. 2, б, на рис. 3 представлены результаты решения уравнения (3) для молекул фтороводорода с концентрацией  $1,0 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$  как зависимость времени измерения от расстояния зондирования в диапазоне до 200 м, которые находятся в хорошем соответствии с результатами работы [3]. Кривые 1 и 2 практически совпали. Аналогичные зависимости для молекул бромоводорода с той же концентрацией ( $1,0 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$ ) представлены на рис. 4.

Как следует из уравнения (3), в нашей экспериментальной ситуации время измерения убывает обратно пропорционально концентрации исследуемых молекул и растет с увеличением расстояния зондирования. Кроме того, из сравнения рис. 2–4 видно, что это связано и со спектральной зависимостью дифференциальных сечений полос колебательного КРС данными молекулами, коэффициентов ослабления лазерного излучения в атмосфере и спектральной чувствительностью фотоприемника. Взятые для моделирования разные значения энергии лазерного импульса на выбранных длинах волн также вносят свой вклад в эти зависимости. В итоге получается, что при зондировании молекул HCl и HBr на расстоянии до 200 м наименьшее время измерения достигается на длине волны лазерного излучения 1064 нм, а при зондировании молекул HF – на длине волны 355 нм.

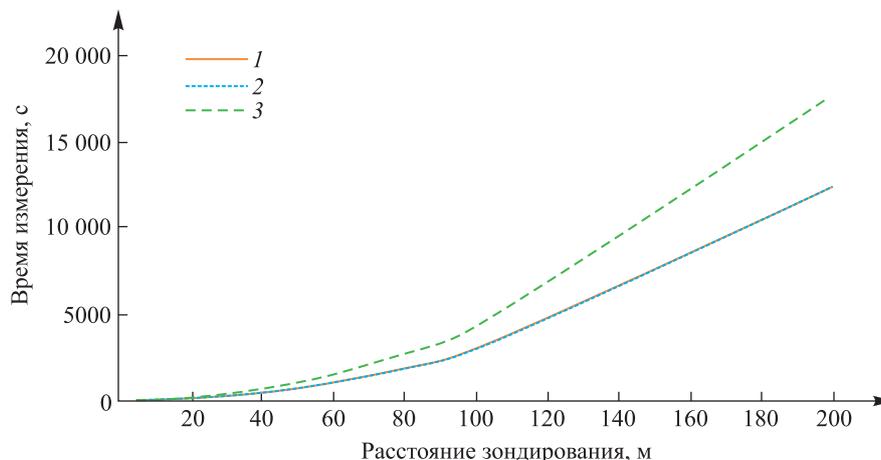


Рис. 3. Графики зависимости времени измерения (в логарифмическом масштабе) от расстояния зондирования для молекул фтороводорода с концентрацией  $1,0 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$  в атмосферном пограничном слое при выбранных длинах волн лазерного излучения (1 – 355 нм; 2 – 532 нм; 3 – 1064 нм)

Fig. 3. The plots of the logarithmic dependence of the measurement time on the ranging distance for hydrogen fluoride molecules with a concentration of  $1.0 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$  in the atmospheric boundary layer at selected laser radiation wavelengths (1 – 355 nm; 2 – 532 nm; 3 – 1064 nm)

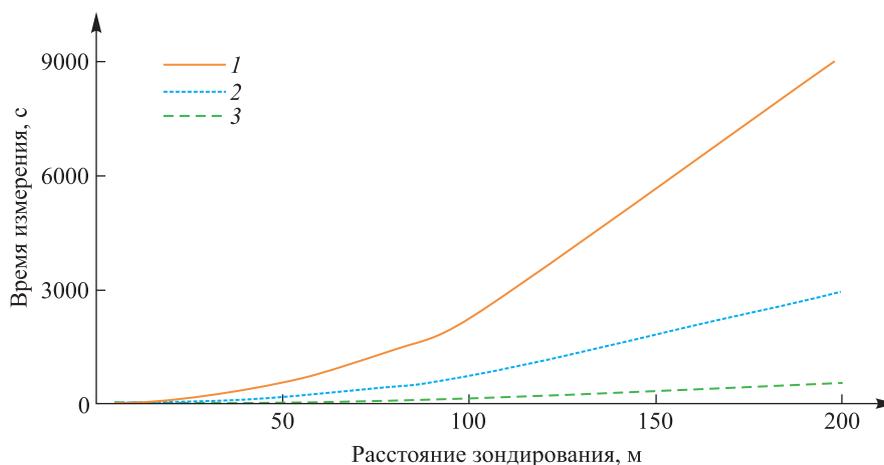


Рис. 4. Графики зависимости времени измерения (в логарифмическом масштабе) от расстояния зондирования для молекул бромоводорода с концентрацией  $1,0 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$  в атмосферном пограничном слое при выбранных длинах волн лазерного излучения (1 – 355 нм; 2 – 532 нм; 3 – 1064 нм)

Fig. 4. The plots of the logarithmic dependence of the measurement time on the ranging distance for hydrogen bromide molecules with a concentration of  $1.0 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$  in the atmospheric boundary layer at selected laser radiation wavelengths (1 – 355 nm; 2 – 532 nm; 3 – 1064 nm)

Время измерения для молекул бромоводорода с концентрациями до  $1,0 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$  в атмосферном пограничном слое на длине волны лазерного излучения 1064 нм, рассчитанное по уравнению (3), также убывает обратно пропорционально концентрации исследуемых молекул (рис. 5).

Очевидно, что дальнейшее уменьшение измеряемой концентрации молекул возможно за счет увеличения времени измерения и частоты следования лазерных импульсов или их энергии. Диапазон времени измерения для исследуемых молекул можно оценить по графикам, представленным на рис. 6. Для всех молекул взяты концентрации, равные ПДК, и лазерное излучение на длине волны 1064 нм.

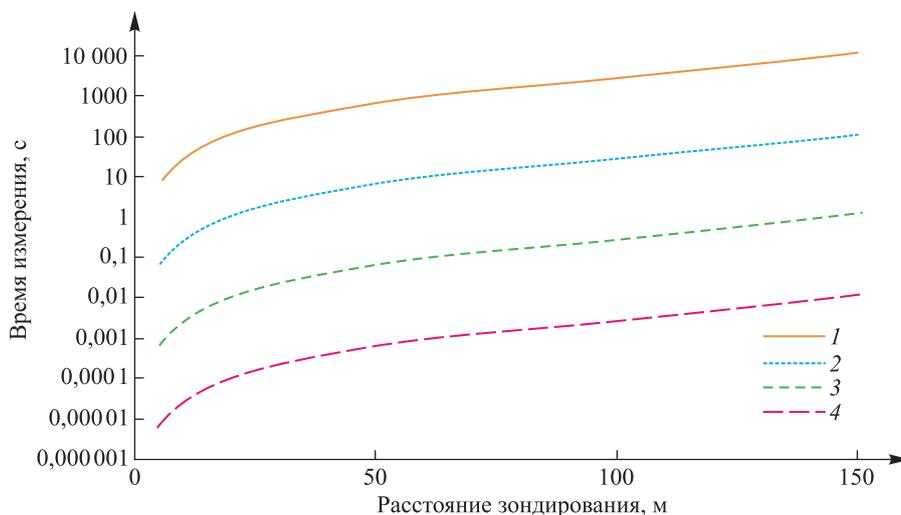


Рис. 5. Графики зависимости времени измерения (в логарифмическом масштабе) от расстояния зондирования для молекул бромоводорода с различной концентрацией в атмосферном пограничном слое ( $1 - 1,0 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$ ;  $2 - 1,0 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ ;  $3 - 1,0 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$ ;  $4 - 1,0 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$ ) при длине волны лазерного излучения 1064 нм

Fig. 5. The plots of the logarithmic dependence of the measurement time on the ranging distance for hydrogen bromide molecules with different concentrations in the atmospheric boundary layer ( $1 - 1,0 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$ ;  $2 - 1,0 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ ;  $3 - 1,0 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$ ;  $4 - 1,0 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$ ) at a laser radiation wavelength 1064 nm

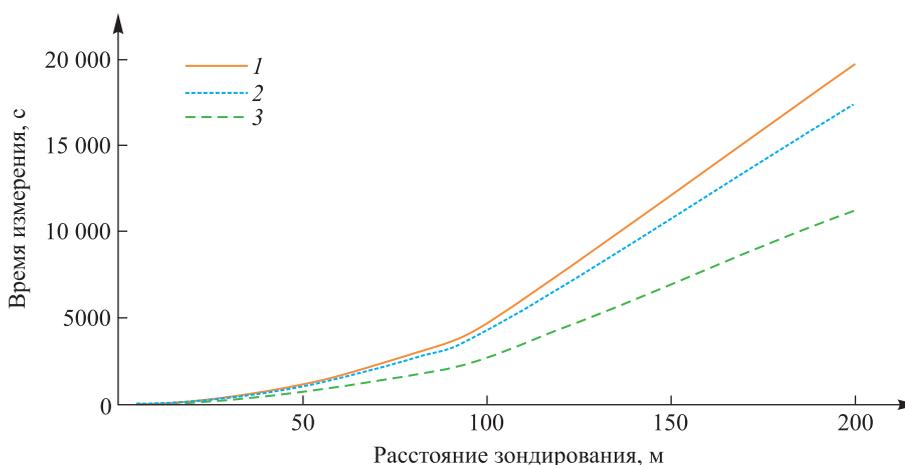


Рис. 6. Графики зависимости времени измерения (в логарифмическом масштабе) от расстояния зондирования для молекул галоидоводородов с концентрацией на уровне ПДК в атмосферном пограничном слое ( $1 - \text{хлороводород} (3,07 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3})$ ;  $2 - \text{фтороводород} (6,02 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3})$ ;  $3 - \text{бромоводород} (1,23 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3})$ ) при длине волны лазерного излучения 1064 нм

Fig. 6. The plots of the logarithmic dependence of the measurement time on the ranging distance for hydrogen halide molecules at the maximum permissible concentration level in the atmospheric boundary layer ( $1 - \text{hydrogen chloride} (3.07 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3})$ ;  $2 - \text{hydrogen fluoride} (6.02 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3})$ ;  $3 - \text{hydrogen bromide} (1.23 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3})$ ) at a laser radiation wavelength 1064 nm

Как видно из рис. 6, наименьшее время измерения концентрации на уровне ПДК получено для молекулы HCl: 33,3 с на расстоянии 50 м и 134,6 с на расстоянии 100 м. Далее следует молекула HF со временем измерения, равным 178,6 с на расстоянии 50 м и 722,5 с на расстоянии 100 м. Время измерения концентрации молекул HBr составило 553,7 с на расстоянии 50 м и 2239,5 с на расстоянии 100 м. Если, как и выше, ограничить время измерения величиной 2000 с ( $\approx 30$  мин), то молекулу HBr можно зарегистрировать на уровне ПДК только на расстоянии зондирования до 89 м.

## Заклучение

Результаты компьютерного моделирования лидара КРС для зондирования молекул галоидоводородов в атмосферном пограничном слое позволяют сделать вывод о том, что выбранные значения его параметров дают возможность измерить концентрации на уровне ПДК всех исследованных молекул. Бромоводород определяется на расстоянии зондирования до 89 м, фтороводород – 277 м, хлороводород – почти 1486 м.

Стоит отметить, что учет конечной ширины лазерной линии и аппаратной функции лидара КРС при зондировании исследованных молекул в атмосферном пограничном слое проявляется в увеличении лидарного сигнала при условии  $\Gamma_a \gg \Gamma_R$  и  $\Gamma_a \gg \Gamma_0$ , но вместе с тем и в повышении шума. По этой причине при минимальной ширине лазерных линий решающим становится выбор оптимальной полуширины интерференционных светофильтров.

## Библиографические ссылки

1. Привалов ВЕ, Фотиади АЭ, Шеманин ВГ. *Лазеры и экологический мониторинг атмосферы*. Санкт-Петербург: Лань; 2013. 287 с. (Учебники для вузов. Специальная литература).
2. Dyachenko VV, Privalov VE, Shemanin VG. Computer simulation of the Raman lidar equation for the carbon cycle molecules in the atmosphere. *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*. 2022;31(1):36–45. DOI: 10.3103/S1060992X22010040.
3. Privalov VE, Shemanin VG. Lidar probing of Raman scattering by hydrofluoride molecules in an atmospheric boundary layer. *Journal of Applied Spectroscopy*. 2021;88(4):802–806. DOI: 10.1007/s10812-021-01243-y.
4. Самохвалов ИВ, Копытин ЮД, Ипполитов ИИ, Балин ЮС, Зуев ВВ, Клишкин ВМ и др. *Лазерное зондирование тропосферы и подстилающей поверхности*. Зуев ВЕ, редактор. Новосибирск: Наука; 1987. 262 с.
5. Зуев ВЕ, Зуев ВВ. *Дистанционное оптическое зондирование атмосферы*. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат; 1992. 232 с. (Современные проблемы атмосферной оптики; том 8).
6. Привалов ВЕ, Шеманин ВГ. Лидарное уравнение с учетом конечной ширины линии генерации лазера. *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. 2015;79(2):170–180. DOI: 10.7868/S0367676515020209.
7. Привалов ВЕ, Шеманин ВГ. Учет ширины линии лазерного излучения в лидарном уравнении для комбинационного рассеяния света. *Оптический журнал*. 2015;82(9):11–15.
8. Борейшо АС, редактор. *Лазеры: применения и приложения*. Санкт-Петербург: Лань; 2016. 520 с. (Учебники для вузов. Специальная литература).
9. Межерис Р. *Лазерное дистанционное зондирование*. Городецкий ИГ, Филюшкин ВВ, переводчики; Карасев АБ, редактор. Москва: Мир; 1987. 550 с.
10. Глазов ГН. *Статистические вопросы лидарного зондирования атмосферы*. Лопасов ВП, редактор. Новосибирск: Наука; 1987. 311 с.
11. Привалов ВЕ, Шеманин ВГ. *Параметры лидаров для дистанционного зондирования газовых молекул и аэрозоля в атмосфере*. Санкт-Петербург: Балтийский государственный технический университет «Военмех» имени Д. Ф. Устинова; 2001. 56 с.
12. Прохоров АМ, редактор. *Справочник по лазерам. Том 1*. Москва: Советское радио; 1978. 504 с.
13. Донченко ВА, Кабанов МВ, Кауль БВ, Самохвалов ИВ. *Атмосферная электрооптика*. Томск: Издательство научно-технической литературы; 2010. 220 с.
14. Хинкли ЭД, редактор. *Лазерный контроль атмосферы*. Москва: Мир; 1979. 416 с.
15. Privalov VE, Shemanin VG. Raman lidar system for the hydrogen molecules remote sensing in atmosphere. *Optics and Spectroscopy*. 2022;130(3):331–335. DOI: 10.21883/EOS.2022.03.53558.2707-21.

## References

1. Privalov VE, Fotiadi AEh, Shemanin VG. *Lazery i ehkologicheskii monitoring atmosfery* [Lasers and environmental monitoring of the atmosphere]. Saint Petersburg: Lan'; 2013. 287 p. (Uchebniki dlya vuzov. Spetsial'naya literatura). Russian.
2. Dyachenko VV, Privalov VE, Shemanin VG. Computer simulation of the Raman lidar equation for the carbon cycle molecules in the atmosphere. *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*. 2022;31(1):36–45. DOI: 10.3103/S1060992X22010040.
3. Privalov VE, Shemanin VG. Lidar probing of Raman scattering by hydrofluoride molecules in an atmospheric boundary layer. *Journal of Applied Spectroscopy*. 2021;88(4):802–806. DOI: 10.1007/s10812-021-01243-y.
4. Samokhvalov IB, Kopytin YuD, Ippolitov II, Balin YuS, Zuev VV, Klimkin VM, et al. *Lazernoe zondirovanie troposfery i podstilayushchei poverkhnosti* [Laser sensing of the troposphere and the underlying surface]. Zuev VE, editor. Novosibirsk: Nauka; 1987. 262 p. Russian.
5. Zuev VE, Zuev VV. *Dstantsionnoe opticheskoe zondirovanie atmosfery* [Remote optical sensing of the atmosphere]. Saint Petersburg: Gidrometeoizdat; 1992. 232 p. (Sovremennye problemy atmosfernoii optiki; volume 8). Russian.
6. Privalov VE, Shemanin VG. [Lidar equation taking into account the finite width of the laser generation line]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya fizicheskaya*. 2015;79(2):170–180. Russian. DOI: 10.7868/S0367676515020209.
7. Privalov VE, Shemanin VG. [Taking the line width of the laser radiation into account in the lidar equation for Raman scattering of light]. *Opticheskii zhurnal*. 2015;82(9):11–15. Russian.
8. Boreisho AS, editor. *Lazery: primeneniya i prilozheniya* [Lasers: use and applications]. Saint Petersburg: Lan'; 2016. 520 p. (Uchebniki dlya vuzov. Spetsial'naya literatura). Russian.

9. Measures RM. *Laser remote sensing: fundamentals and applications*. New York: John Wiley & Sons; 1984. XII, 510 p.  
Russian edition: Measures R. *Lazernoe distantsionnoe zondirovanie*. Gorodetskii IG, Filyushkin VV, translators; Karasev AB, editor. Moscow: Mir; 1987. 550 p.
10. Glazov GN. *Statisticheskie voprosy lidarnogo zondirovaniya atmosfery* [Statistical issues of lidar sensing of the atmosphere]. Lopasov VP, editor. Novosibirsk: Nauka; 1987. 311 p. Russian.
11. Privalov VE, Shemanin VG. *Parametry lidarov dlya distantsionnogo zondirovaniya gazovykh molekul i aehrozolya v atmosfere* [Lidar parameters for remote sensing of gas molecules and aerosol in the atmosphere]. Saint Petersburg: Baltic State Technical University «Voenmeh» named after D. F. Ustinov; 2001. 56 p. Russian.
12. Prokhorov AM, editor. *Spravochnik po lazeram. Tom 1* [Lasers handbook. Volume 1]. Moscow: Sovetskoe radio; 1978. 504 p. Russian.
13. Donchenko VA, Kabanov MV, Kaul' BV, Samokhvalov IV. *Atmosfernaya ehlektrooptika* [Atmospheric electro-optics]. Tomsk: Izdatel'stvo nauchno-tekhnicheskoi literatury; 2010. 220 p. Russian.
14. Hinkley ED, editor. *Laser monitoring of the atmosphere*. Berlin: Springer-Verlag; 1976. XV, 382 p. (Topics in applied physics; volume 14). DOI: 10.1007/3-540-07743-X.  
Russian edition: Hinkley ED, editor. *Lazernyi kontrol' atmosfery*. Moscow: Mir; 1979. 416 p.
15. Privalov VE, Shemanin VG. Raman lidar system for the hydrogen molecules remote sensing in atmosphere. *Optics and Spectroscopy*. 2022;130(3):331–335. DOI: 10.21883/EOS.2022.03.53558.2707-21.

Получена 18.12.2023 / исправлена 20.12.2023 / принята 20.12.2023.  
Received 18.12.2023 / revised 20.12.2023 / accepted 20.12.2023.