

## ЛАЗЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ

doi: 10.51639/2713-0568\_2023\_3\_2\_46

УДК 535.621(075.8)

ГРНТИ 29.31.29

ВАК 1.3.19

### Дистанционное зондирование молекул аммиака в атмосферном пограничном слое

\*<sup>1</sup> Привалов В. Е., <sup>2,3</sup> Шеманин В. Г.

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Филиал Белгородского государственного технологического университета имени В.Г. Шухова в Новороссийске, Новороссийск, Россия

<sup>3</sup> Новороссийский политехнический институт (филиал) Кубанского государственного технологического университета, Новороссийск, Россия

e-mail: \* [vaevpriv@yandex.ru](mailto:vaevpriv@yandex.ru)

В последнее время аммиак рассматривается как эффективное безуглеродное топливо для самолётов и ракет. Поэтому необходим дистанционный мониторинг утечек или выбросов аммиака из трубопроводов и ёмкостей хранения. В работе выполнена теоретическая оценка возможности применения лидара комбинационного рассеяния света для дистанционного измерения уровней концентраций аммиака порядка ПДК и выше. Результаты компьютерного моделирования показывают, что зондирование исследуемых молекул с концентрациями  $N(z) = 10^{18} \text{ м}^{-3}$  на длине волны лазерного излучения 355 нм в диапазоне зондирования до 1500 м достаточно времени измерения от 0,3 с до 238,5 мин.

*Ключевые слова:* дистанционный мониторинг, аммиак, концентрация, лидар комбинационного рассеяния света, время измерения.

### Введение

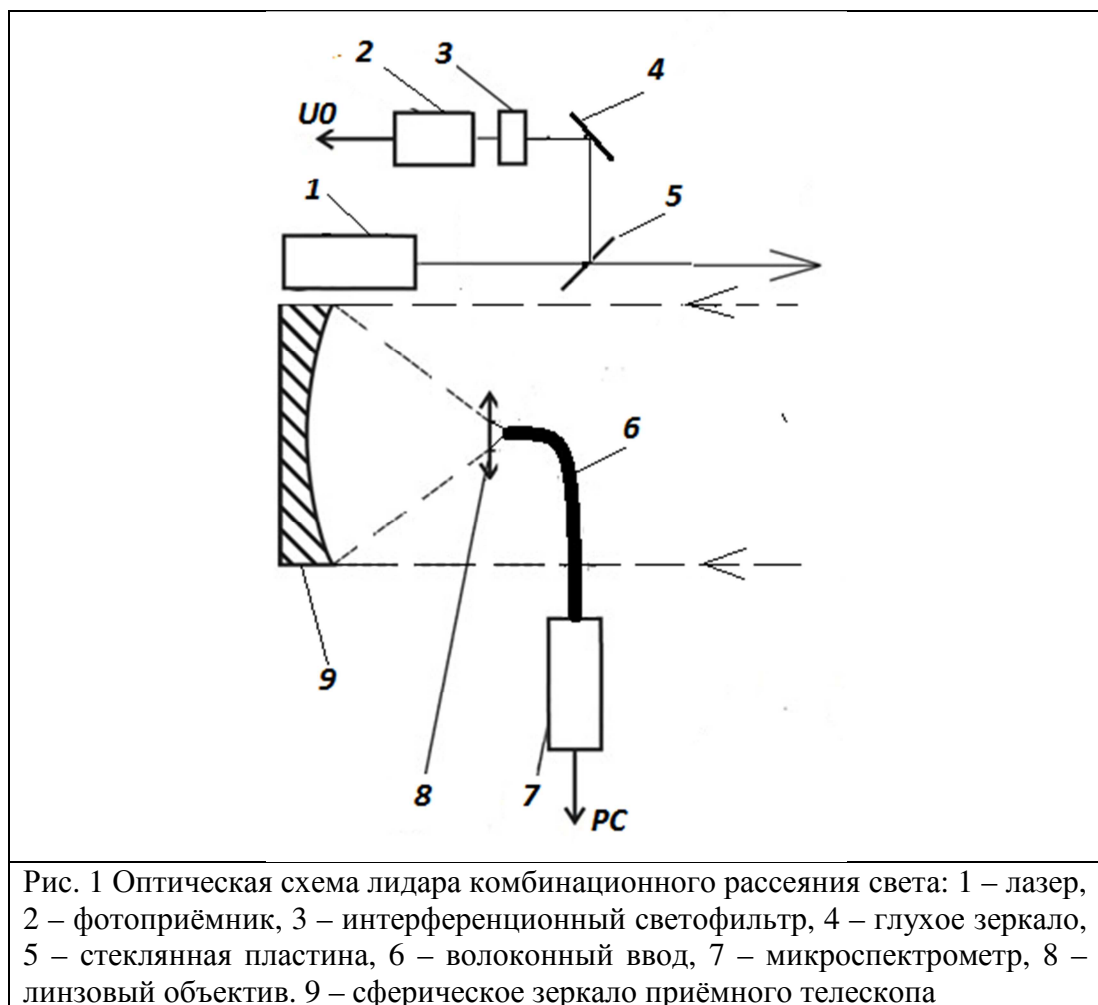
Аммиак относится к числу важнейших продуктов химической промышленности, ежегодное его мировое производство превышает 180 млн. тонн. При нормальных условиях, аммиак – это бесцветный газ с резким характерным запахом. Токсичен, предельно-допустимая концентрация в атмосфере (ПДК) составляет  $0,04 \text{ мг/м}^3$  – 4-й класс опасности в соответствии с ГОСТ 12.1.007-76 [1, 2]. В целом, химическое загрязнение атмосферы относится к наиболее опасным факторам для жизни человека. И среди главных источников химического загрязнения являются отходы, образующиеся при эксплуатации транспорта, при сжигании топлива, а также промышленные и другие отходы, в том числе аммиак ( $\text{NH}_3$ ). Однако в последнее время аммиак рассматривается как эффективное безуглеродное топливо для самолётов и ракет. Поэтому необходим дистанционный мониторинг утечек или выбросов аммиака из трубопроводов и ёмкостей хранения.

Целью работы является теоретическая оценка возможности применения лидара комбинационного рассеяния света для дистанционного измерения уровней концентраций аммиака порядка ПДК и выше. Для этого было выполнено компьютерное моделирование

лидарного уравнения для комбинационного рассеяния света молекулами аммиака в атмосферном пограничном слое на заданном уровне и на расстояниях зондирования до 1500 м в режиме синхронного счёта фотонов для выбора оптимальных параметров такого лидара. Результаты моделирования позволят найти оптимальное решение такой задачи.

### Параметры лидара комбинационного рассеяния света и молекулы аммиака

Для дистанционного измерения уровней концентраций аммиака порядка ПДК и выше предложен лидар комбинационного рассеяния света исследуемыми молекулами в атмосферном пограничном слое на этом уровне и на расстояниях зондирования до 1500 м в режиме синхронного счёта фотонов. Оптическая схема лидара комбинационного рассеяния света с биаксиальной схемой как в [1, 3–6] и приведена на рисунке 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 405 и 675 нм с длительностью импульсов 10 нс и энергиями в импульсе до 1 мДж при частоте следования лазерных импульсов  $f$  до 100 кГц [4, 6]. Излучение лазера 1 направлялось параллельно оси приемного телескопа на расстоянии 150 мм, как и в [4, 7], а излучение комбинационного рассеяния молекулами водорода в атмосфере в направлении назад собиралось приёмным телескопом типа

Ньютона со сферическим зеркалом 9 диаметром 200 мм и фокусировалось линзовым объективом 8 в волоконный ввод 6 микро спектрометра 7, работающего на линии с ПК. Часть лазерного излучения направлялось 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 отсчета времени измерения. Эти данные и выбранная часть спектра комбинационного рассеяния света молекулами аммиака записываются в ПК для дальнейшей обработки.

### Лидарное уравнение для комбинационного рассеяния света

В работе [5, 8] было предложено лидарное уравнение для комбинационного рассеяния света газовыми молекулами в атмосфере с учетом конечной ширины линии генерации. Обычно энергия или мощность импульса комбинационного рассеяния света исследуемыми молекулами регистрируемая лидаром мала и поэтому используется режим счета фотонов [1, 5, 6]. В этом случае лазер лидара удобнее характеризовать числом фотонов  $n_0$  в импульсе посылаемого в атмосферу лазерного излучения длительностью  $\tau_0$ . Тогда для числа фотонов  $n(\nu, z)$  излучения комбинационного рассеяния света исследуемыми молекулами водорода с концентрацией  $N(z)$  на фотоприемнике лидара можно переписать лидарное уравнение в направлении назад (1) в режиме счёта фотонов в виде [5, 9]:

$$n(\nu, z) = n_0 \frac{c\tau_0}{2z^2} G(z) f t S_0 N(z) \left( \frac{d\sigma}{d\Omega} \right) \int_{\nu_0 - \Gamma_0}^{\nu_R + \Gamma_R} T_0(\nu_0, z) \cdot T(\nu_R, z) \cdot \Phi(\nu) A(\nu) d\nu, \quad (1)$$

где  $n(\nu, z)$  – число фотонов, зарегистрированное фотоприемником лидара на частоте  $\nu_R$  комбинационного рассеяния света с расстояния зондирования  $z$ ;  $n_0$  – число фотонов на частоте  $\nu_0$  лазерного излучения и  $t$  – время измерения или накопления сигнала. Функцию распределения фотонов лазерного излучения в линии генерации [5, 10]  $\Phi(\nu)$  в нашем случае будем считать Гауссовой и она может быть записана как

$$\Phi(\nu) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\Gamma_0} \exp\left[-\frac{(\nu - \nu_0)^2}{2\Gamma_0^2}\right]. \quad (2)$$

Кроме того, будем считать, что аппаратная функция или спектральный коэффициент пропускания приёмной системы лидара  $A(\nu)$  [1, 6, 8] имеет Лоренцевскую форму и настроена точно на частоту  $\nu_R$  полосы комбинационного рассеяния света молекулами водорода с полушириной  $\Gamma_a$ , которая больше чем  $\Gamma_R$  и  $\Gamma_0$

$$A(\nu) = \frac{K_1 \xi(\nu_R)}{\pi} \frac{\Gamma_a}{(\nu - \nu_R)^2 + \Gamma_a^2}, \quad (3)$$

где  $K_1$  – лидарная константа на частоте  $\nu_0$  лазерного излучения, измеренная экспериментально в [7], а  $\xi(\nu_R)$  – относительная спектральная чувствительность фотоприемника на частоте  $\nu_R$  излучения комбинационного рассеяния света [11]. Перепишем уравнение (1) с учётом (2) и (3) в виде

$$n(\nu, z) = n_0 \frac{c\tau_0}{2z^2} G(z) f t S_0 N(z) \frac{d\sigma}{d\Omega} \int_{\nu_0 - \Gamma_0}^{\nu_R + \Gamma_R} \exp\left[-\int_0^z \{\alpha(\nu_0, r) + \alpha(\nu_R, r)\} dr\right] \times \\ \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}\Gamma_0} \exp\left[-\frac{(\nu' - \nu_0)^2}{2\Gamma_0^2}\right] \frac{K_1 \xi(\nu_R)}{\pi} \frac{\Gamma_a}{(\nu' - \nu_R)^2 + \Gamma_a^2} d\nu'. \quad (4)$$

Далее, полагая коэффициенты ослабления на частотах лазерного излучения и комбинационного рассеяния света молекулами водорода  $\alpha(\nu_0, r)$  и  $\alpha(\nu_R, r)$  мало зависящими от частоты, можем переписать уравнение (4) в виде:

$$n(\nu, z) = n_0 \frac{c\tau_0}{2z^2} G(z) f t S_0 N(z) \frac{d\sigma}{d\Omega} \exp\left[-\int_0^z \{\alpha(\nu_0, r) + \alpha(\nu_R, r)\} dr\right] \times \\ \times \int_{\nu_0 - \Gamma_0}^{\nu_R + \Gamma_R} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\Gamma_0} \exp\left[-\frac{(\nu' - \nu_0)^2}{2\Gamma_0^2}\right] \frac{K_1 \xi(\nu_R)}{\pi} \frac{\Gamma_a}{(\nu' - \nu_R)^2 + \Gamma_a^2} d\nu' \quad (5)$$

где последний интеграл можно представить в виде:

$$\int_{\nu_0-\Gamma_0}^{\nu_R+\Gamma_R} \Phi(\nu') A(\nu') d\nu' = \frac{K_1 \xi(\nu_R) \Gamma_a}{\pi} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \Gamma_0} \int_{\nu_0-\Gamma_0}^{\nu_0+\Gamma_0} e^{-\frac{(\nu'-\nu_0)^2}{2\Gamma_0^2}} \int_{\nu_R-\Gamma_a}^{\nu_R+\Gamma_a} \frac{d\nu'}{(\nu'-\nu_R)^2 + \Gamma_a^2} =$$

$$= 2\pi \Gamma_0 \operatorname{erf}\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) \frac{K_1 \xi(\nu_R) \Gamma_a}{\pi} \frac{\pi}{2\Gamma_a} = \frac{2\pi \Gamma_0 K_1 \xi(\nu_R)}{2} 0,2611 = 0,82 \Gamma_0 K_1 \xi(\nu_R),$$
(6)

учитывая, что диапазоны интегрирования не перекрываются в силу того, что расстояние между  $\nu_0$  и  $\nu_R$  много больше, чем  $\Gamma_a$ . Тогда выражение (5) перепишем в виде

$$n(\nu, z) = 0,82 n_0 \frac{c\tau_0}{2z^2} G(z) f t S_0 N(z) \frac{d\sigma}{d\Omega} \Gamma_0 K_1 \xi(\nu_R) \frac{d\sigma}{d\Omega} \times$$

$$\times \exp\left[-\int_0^z \{\alpha(\nu_0, r) \cdot +\alpha(\nu_R, r)\} dr\right].$$
(7)

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 исследуемыми молекулами [12]. Выразим из уравнения (7) время измерения  $t$  как меру эффективности лидарной системы с теми же обозначениями (4) и (5) и рассмотрим спектральную и концентрационную зависимости решения этого уравнения

$$t = \frac{n(\nu, z) z^2}{B Y(\nu, z) N(z)},$$
(8)

где

$$B = 0,82 \frac{c\tau_0}{2} f S_0$$

и

$$Y(\nu, z) = n_0 G(z) \frac{d\sigma}{d\Omega} \Gamma_0 K_1 \xi(\nu_R) \frac{d\sigma}{d\Omega} \times \exp\left[-\int_0^z \{\alpha(\nu_0, r) \cdot +\alpha(\nu_R, r)\} dr\right].$$

Также предположим, что полуширина аппаратной функции на порядок больше, чем полуширина линии генерации лазера, что вполне допустимо для промышленных лазеров и интерференционных светофильтров в качестве спектроанализатора лидара [1, 6].

## Результаты компьютерного моделирования

Используя это уравнения (8), оценим возможность измерений лидаром комбинационного рассеяния света концентраций исследуемых молекул в атмосферном пограничном слое на заданном уровне в направлении назад и на расстояниях зондирования до 1500 м. Выполним компьютерное моделирование лидарного уравнения (8) комбинационного рассеяния света в направлении назад в режиме счёта фотонов. Возьмём исследуемые молекулы аммиака с концентрацией равной ПДК и по результатам моделирования оценим наименьшее время измерения. Дифференциальное сечение комбинационного рассеяния ( $d\sigma/d\Omega$ ) молекулами  $\text{NH}_3$  при возбуждении лазерным излучением с длиной волны 337 нм и равно  $11,0 \cdot 10^{-30} \text{ см}^2/\text{ср}$  из [6, 13]. Для зондирующего излучения третьей и второй гармоники YAG Nd-лазера с накачкой полупроводниковым лазером с длинами волн 355 и 532 нм и полупроводниковых лазеров с длинами волн 405 и 675 нм с длительностью импульсов 10 нс и энергиями в импульсе до 1 мДж при частоте следования лазерных импульсов  $f$  до 100 кГц [6, 14]. Излучение лазера направлялось параллельно оси приемного телескопа на расстоянии 150 мм, как и в [1, 6], а излучение комбинационного рассеяния молекулами водорода в атмосфере в направлении назад собиралось приёмным телескопом типа Ньютона со сферическим зеркалом диаметром 400 мм и фокусировалось

линзовым объективом в волоконный ввод микро спектрометра FSD-8, который работал на линии с ПК.

Будем рассматривать однократное комбинационное рассеяние света и однородную атмосферу [1, 6, 12]. Основные параметры исследуемых молекул, атмосферы и фотоприемников взяты из [1, 5, 6, 15]. Значения максимума полосы валентных N-H колебаний молекул водорода равно  $3334 \text{ см}^{-1}$  по данным [1, 6, 7, 13] и для всех длин волн лазерного излучения были рассчитаны длины волн полос колебательного комбинационного рассеяния света молекулами водорода, приведенные в таблице 1.

Значения дифференциальных сечений комбинационного рассеяния света для молекул  $\text{NH}_3$  ( $d\sigma/d\Omega$ ) =  $11,0 \times 10^{-30} \text{ см}^2$  из [6, 13] и для всех выбранных длин волн лазерного излучения были определены по этим данным, экспериментально измеренным в [13] при комнатной температуре и нормальном давлении на длине волны излучения 337 нм и для интересующих нас длин волн рассчитаны с учётом зависимости  $1/\lambda^4$  [7]. Все эти значения приведены в таблице 1. Значения коэффициентов ослабления для этих частот  $\alpha(v_0, z)$  и  $\alpha(v_R, z)$  из [16] также собраны в таблице 1. Поперечное сечение зеркала приёмного телескопа лидара было  $0,1256 \text{ м}^2$ . а шаг по расстоянию – 7,5 м для времени одного измерения 50 нс.

Таблица 1

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

Длина волны, $\lambda$ , нм	Дифференциальное сечение КРС ( $d\sigma/d\Omega$ ) $10^{30} \text{ см}^2/\text{ср}$	Коэффициент ослабления $\alpha(v_0, r)$ , $\text{км}^{-1}$	Коэффициент ослабления $\alpha(v_R, r)$ , $\text{км}^{-1}$	Относительная спектральная чувствительность фотоприёмника $\xi(v)$
$\text{NH}_3$	$4161 \text{ см}^{-1}$			ПДК= $1.42 \times 10^{18} \text{ м}^{-3}$
355	8,93	0.31		
402.7			0.18	0.9
532	1.77	0.16		
646.7			0.14	0.95
405	5.27	0.24		
468.2			0.13	0.82
675	0.68	0,14		
891,0			0,12	0.25
377	11.0			

С этими данными рассмотрим численное решение уравнения (8), полагая, что  $G(z)$  в нашем случае равно 1, и концентрация молекул водорода – в диапазоне  $N(z) = 10^{18} \dots 10^{24} \text{ м}^{-3}$ . Для нашей экспериментальной ситуации за время измерения  $t$  может быть зарегистрировано 200 фотонов [14].

Для этого случая выполним решение уравнения (8) для всех значений длин волн лазерного излучения 355, 532, 405 и 675 нм с частотой следования лазерных импульсов 100 кГц, энергии в импульсе 1 мДж и диапазона расстояния зондирования от 10 м до 1500 м. Результаты решения уравнения (8) для этого случая представлены на рисунке 2 как зависимость времени измерения  $t$  для нашей экспериментальной ситуации от расстояния зондирования  $z$ .

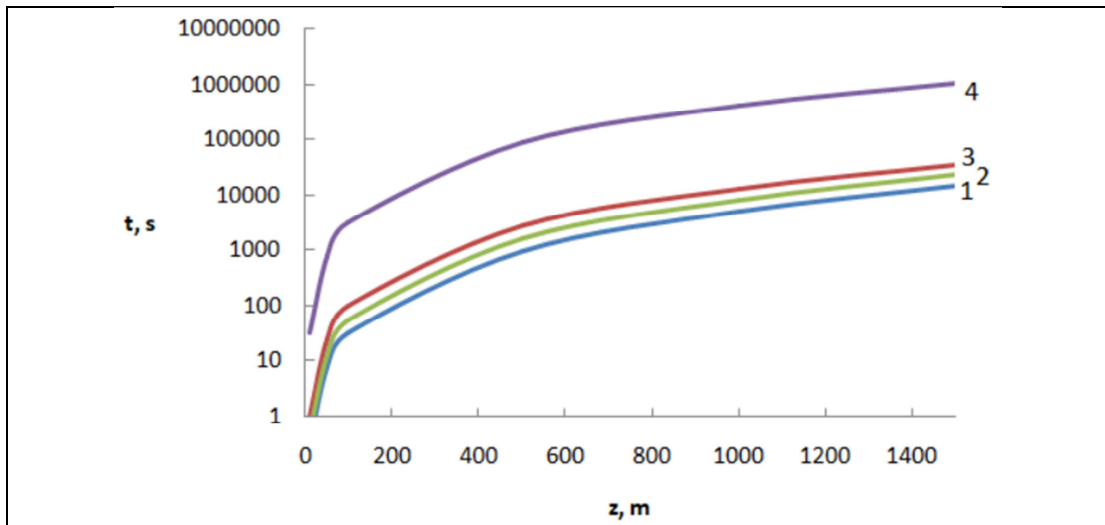


Рис. 2. Графики рассчитанной по уравнению (8) логарифмической зависимости времени измерения  $t$  для молекул аммиака с концентрацией  $N(z) = 10^{14} \text{ м}^{-3}$  (в с) от расстояния зондирования  $z$  (в м) для длин волн лазерного излучения 532(3), 405(2), 355(1) и 675(4) нм при зондировании атмосферного пограничного слоя лидаром комбинационного рассеяния света

На графиках рис. 2 видно увеличение времени измерения  $t$  в ряду длин волн лазерного излучения 355-405-532-675 за счёт спектральной зависимости величин, входящих в уравнение (8), при этом величина времени измерения резко нарастает за первые 100 м примерно на порядок, а наименьшее значение  $t$  получаем для длины волны лазерного излучения 355 нм. В этом случае на рисунке 2 все кривые удается различить и уточнить, что для больших расстояний порядка 1000 м наименьшее время измерения так же получается для длины волны 355 нм.

Более наглядно зависимость концентрации молекул водорода  $N(z)$  от расстояния зондирования  $z$  для одного и того же времени измерения  $t = 100$  с для всех длин волн лазерного излучения можно представить, выразив из уравнения (8), величину  $N(z)$  в виде

$$N(z) = \frac{n(\nu, z) z^2}{BY(\nu, z) t}. \quad (9)$$

Рассмотрим численное решение уравнения (9) для диапазона концентрации молекул водорода  $N(z)$  от  $10^{18} \text{ см}^{-3}$  до  $10^{22} \text{ м}^{-3}$ . Для этого выполним решение этого уравнения для длин волн лазерного излучения 355 нм как наилучший вариант по данным рисунка 2. Результаты решения уравнения (9) представлены на рисунке 3.

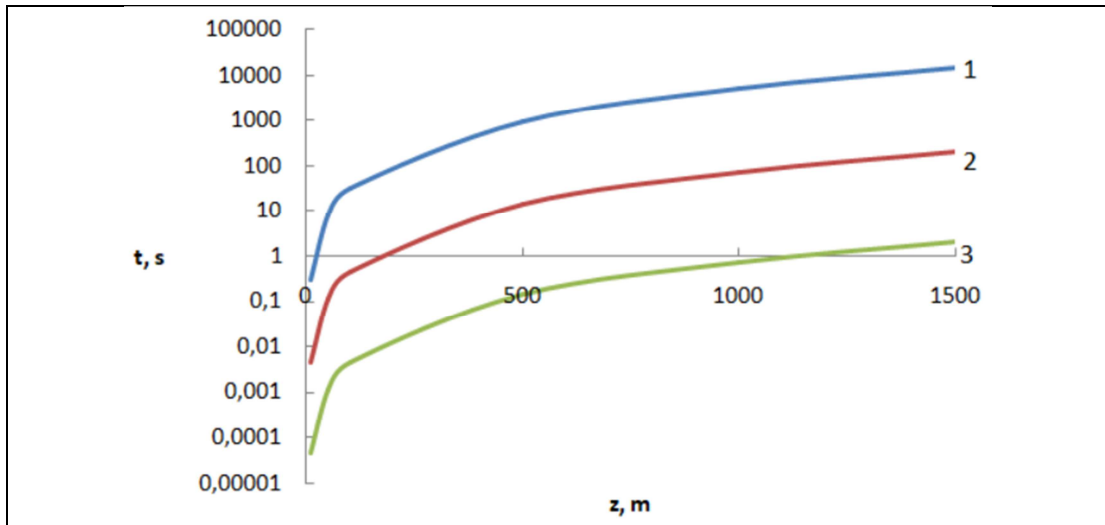


Рис. 3 Графики рассчитанной по уравнению (9) логарифмической зависимости времени измерения  $t$  (в с) от расстояния зондирования  $z$  (в м) для концентрации молекул водорода  $N(z)$  (в  $\text{м}^{-3}$ )  $10^{18}$  (1),  $10^{20}$  (2) и  $10^{22}$  (3) для длины волны лазерного излучения 355 нм для той же самой экспериментальной ситуации

Как видно из графиков рисунка 3 кривые для выбранной длины волны лазерного излучения 355 нм с увеличением концентрации резко убывает примерно на те же порядки на расстояниях зондирования до 1500 м. Причём, на расстоянии зондирования 10 м время измерения уменьшается с 307 мс до 43,5 мкс, а на расстоянии зондирования 1000 м время измерения уменьшается с почти 5000 с до 2,03 с.

Как видно из графиков рисунка 3 наилучший результат дает зондирование с длиной волны лазерного излучения 355 нм и позволяет измерить значение концентрации меньше ПДК.

### Заключение

Полученные результаты моделирования означают, что в зависимости от ожидаемой реальной концентрации на заданном расстоянии зондирования можно будет по времени измерения выбрать параметры лазера, телескопа и фотоприёмника для создания такой лидарной системы комбинационного рассеяния света молекулами аммиака. Такой выбор определяется спектральной зависимостью дифференциальных сечений полосы колебательного комбинационного рассеяния света молекулами аммиака, 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 частоты следования лазерных импульсов  $f$  или увеличения их энергии  $E_0$ .

Таким образом, полученные результаты позволяют выбрать оптимальные параметры лазера и лидара комбинационного рассеяния света для зондирования молекул аммиака в атмосферном пограничном слое на расстояниях зондирования до 1500 м. Причём они хорошо согласуются с результатами наших прежних работ [17, 18]. Чтобы зондировать исследуемые молекулы с концентрациями  $N(z) = 10^{18} \text{ м}^{-3}$  на длине волны лазерного излучения 355 нм в диапазоне зондирования до 1500 м достаточно времени измерения от 0,3 с до 238,5 мин, что сложно реализовать в одном лидаре комбинационного рассеяния

света в конкретных экспериментальных условиях [6, 7, 19, 20]. Если ограничить диапазон зондирования 500 м, то достаточно будет времени измерения 15,8 мин. Поэтому, подбирая время измерения за счёт параметров лидара, можно увеличить расстояние зондирования для необходимых концентраций молекул аммиака в атмосферном пограничном слое. Для концентрации равной ПДК и по результатам моделирования наименьшее время измерения получилось на длине волны лазерного излучения 355 нм. Оно возрастает с 0,3 с на расстоянии 10 м до 32,03 с – на 100 м. А наибольшее время измерения требуется для длины волны лазерного излучения 675 нм – 30,9 с на расстоянии 10 м и 3167,4 с (или почти 53 мин) – на 100 м.

Следовательно, есть возможность выбора оптимальных длины волны лазерного излучения и параметров такого лидара для зондирования в атмосфере молекул NH<sub>3</sub>. Всё определяется уровнем концентрации исследуемых молекул и требуемым расстоянием зондирования.

### **Конфликт интересов**

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

### **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. 51с.
3. Privalov V. E., Shemanin V. G. Hydrogen Sulfide Molecules Lidar Sensing in the Atmosphere. // Optical Memory and Neural Networks. 2018. V. 27. No. 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. Привалов В. Е., Шеманин В. Г. Лидарное уравнение с учетом конечной ширины линии генерации лазера. // Известия РАН. Серия Физическая. 2015. Т. 79. № 2. С. 170-180.
6. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. - 550 с.
7. Привалов В. Е., Шеманин В. Г. Параметры лидаров для дистанционного зондирования газовых молекул и аэрозоля в атмосфере. - С-Пб.: Балт. ГТУ “ВОЕНМЕХ”. 2001. - 56 с.
8. Privalov V. E., Shemanin V. G. The Lidar Equation Solution Depending on the Laser Radiation Line Width Studies // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). 2013. V. 22, No.4. P. 244-249. DOI: 10.3103/S1060992X13040073
9. Привалов В. Е., Шеманин В. Г. [Уравнение лазерного зондирования для реального аэрозольного лидара](#). // Фотоника. 2013. №2(38), С. 72-78
10. Долгих Г. И., Привалов В. Е. Лазеры. Лазерные системы. Владивосток: Изд. Дальнаука, 2009. 202 с.
11. <http://optofiber.ru/ru/spectrometers/mini-spektrometr>. Мини Спектрометр с волоконным входом FSD9-FSD10 v6-2 на диапазон 180-1080 нм с высокочувствительной ФПЗС линейкой TCD1304DG(M / X) – 3500 пикселей



- 12 Донченко В. А., Кабанов М. В., Кауль Б. В., Самохвалов И. В. Атмосферная электрооптика. Томск: Изд-во НТЛ. 2010. С. 178-181
13. Лазерный контроль атмосферы. Под. ред. Э. Д. Хинкли. -М.:Мир, 1979 - 416 с.
14. Глазов Г. Н. Статистические вопросы лидарного зондирования атмосферы. - Новосибирск: Наука, 1987 -308 с.
15. Privalov V. E., Shemanin V. G. On the selection of a radiation source for one of the problems of laser probing. // Optics and Spectroscopy. 1997. V. 82. No. 4. P. 650-652.
16. Справочник по лазерам. Под ред. Прохорова А. М. Т. 1. М.: Советское радио. 1978. 504 с.
17. Лактюшкин Г. В., Привалов В. Е., Шеманин В. Г. Параметры зондирования молекулярного водорода в атмосфере на наклонных трассах лидаром с Nd-YAG-лазером, //ЖТФ. 1998. Т. 68, No. 1. С. 20–22.
18. Privalov V. E., Shemanin V. G. Hydrogen and iodine molecules lidar monitoring in atmosphere // Proceedings SPIE. 2000. V.4064. P. 2 – 11
19. Dyachenko V. V., Chartiy 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. 272 032003. 6 pp. IOP Publishing. doi:10.1088/1755-1315/272/3/032003
20. Привалов В. Е., Шеманин В. Г. Дистанционное лазерное зондирование углеводородов в атмосфере. //Письма в Журнал технической физики. 2001. Т.27. №21. С. 71-75.

### **Remote sensing of ammonia molecules in the atmospheric boundary layer**

Privalov V. E., Shemanin V. G.

<sup>1</sup> *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia*

<sup>2</sup> *V.G. Shukhov Belgorod State Technological University branch in Novorossiysk, Novorossiysk, Russia*

<sup>3</sup> *Novorossiyskiy Polytechnic Institute (branch) Kuban State Technological University, Novorossiysk, Russia*

Recently, ammonia has been considered as an effective carbon-free fuel for airplanes and rockets. Therefore, remote monitoring of the ammonia leaks or emissions from pipelines and storage tanks is necessary. The paper presents a theoretical assessment of the possibility of using the Raman lidar for remote measurement of ammonia concentration levels of the order of MPC and higher. The computer simulation results show that the lidar remote sensing of the studied molecules with concentrations  $N(z) = 10^{18} \text{ m}^{-3}$  at the 355 nm wavelength of laser radiation in the ranging range up to 1500 m is sufficient for measuring time from 0.3 s to 238.5 min.

*Key words:* remote monitoring, ammonia, concentration, Raman lidar, measurement time.