

Содержание:

## **ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА**

- В.В. Дьяченко, В. Е. Привалов, В. Г. Шеманин*  
Зондирование молекул метанола в атмосфере лидаром комбинационного  
рассеяния света..... стр. 4
- Половченко С.В., Привалов В.Е., Чартий П.В.*  
Оценка дисперсного состава цементного аэрозоля по результатам  
лазерного зондирования..... стр. 12

## **ПРИБОРОСТРОЕНИЕ**

- Веденин Е.И., Сарычев И.А., Чартий П.В., Половченко С.В.*  
Лазерная система для исследования распределения по размерам частиц  
зондируемого аэрозоля методом дифференциального ослабления и  
рассеяния лазерного излучения..... стр. 16
- А. М. Вальшин, И.А. Смирнов*  
Обработка данных физического эксперимента с использованием языка  
программирования Python..... стр. 26

## **ЛАЗЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ**

- Привалов В.Е., Чербачи Ю.В., В.Г. Шеманин*  
Компьютерное моделирование лидарного уравнения для комбинационного  
рассеяния света молекулами алканов..... стр. 32

## **ЛАЗЕРНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ**

- Дьяченко В.В., Куля Д.Н.*  
Лазерное зондирование аэрозольного загрязнения атмосферного воздуха  
над мусорным полигоном в г. Новороссийске..... стр. 43

## ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА

УДК 535:621.373.8, 535.621(075.8)

ГРНТИ 29.33.15

ВАК 01.04.21

### Зондирование молекул метанола в атмосфере лидаром комбинационного рассеяния света

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

<sup>1</sup> Новороссийский политехнический институт (филиал) Кубанского государственного технологического университета, Новороссийск, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

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

Представлены результаты компьютерного моделирования лидарного уравнения для комбинационного рассеяния света молекулами метанола в направлении назад при зондировании молекул в атмосфере с концентрациями в диапазоне  $10^{12}$  см<sup>-3</sup>...  $10^{18}$  см<sup>-3</sup> на расстояниях до 1000 м в режиме синхронного счета фотонов. Показано, что за время измерения 1 с лидаром комбинационного рассеяния света на длине волны лазерного излучения 405 нм можно зондировать молекулы метанола с уровнем концентрации порядка  $10^{16}$  см<sup>-3</sup> на расстояниях до 600 м.

**Ключевые слова:** лидар, уравнение, комбинационное рассеяние света, молекула, метанол, концентрация, счет фотонов.

#### Введение

В настоящее время метанол все активнее используется в качестве замены традиционным видам моторного топлива [1]: он гораздо дешевле, и при этом наносит гораздо меньший вред окружающей среде, чем привычные бензин, керосин или дизтопливо. Поэтому становится актуальной разработка новых лидаров для измерения концентрации молекул метанола CH<sub>3</sub>OH как загрязняющего вещества на уровне предельно-допустимых концентраций (ПДК) в атмосферном воздухе. Для метанола, класс опасности которого 3, значение ПДК 1.0 мг/м<sup>3</sup> [2, 3] или порядка  $1.9 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>.

Ранее в [1, 2, 4, 5] было показано, что лидар комбинационного рассеяния света может использоваться для дистанционного измерения концентрации молекул на уровне сотен ПДК и более. А мониторинг паров метанола лидаром в атмосферном пограничном слое в диапазоне расстояний зондирования до 1000 м может стать эффективным способом решения этой проблемы. Поэтому целью настоящей работы является оценка параметров лидара комбинационного рассеяния света для зондирования молекул метанола в атмосферном пограничном слое на уровне ПДК и выше в режиме синхронного счета фотонов. Для этого выполнено численное решение лидарного уравнения для комбинационного рассеяния света молекулами метанола с целью выбора длины волны лазерного излучения и параметров

лидара для измерения минимального значения концентрации молекул  $\text{CH}_3\text{OH}$  на заданном расстоянии зондирования.

### Спектр комбинационного рассеяния света метанола.

На первом этапе был выполнен анализ спектра комбинационного рассеяния света молекулами метанола для выбора сильных характеристических полос комбинационного рассеяния света метанола и сравнения их с полосами возможных молекул примесей, таких как метан, этанол и формальдегид в предположении, что концентрации исследуемых молекул равны 1 ПДК. Значение максимумов полос валентных  $\text{CH}$  колебаний всех четырех молекул и валентных  $\text{CO}$  колебаний молекул метанола, этанола и формальдегида взяты из [2, 5, 6, 7] и собраны в Таблице 1. Значения дифференциальных сечений комбинационного рассеяния света для исследуемых молекул взяты из [5, 8] и оценены по данным [5] для сравнения интенсивностей полос. Эти параметры так же собраны в Таблице 1. Таблица 1. Значения максимумов полос комбинационного рассеяния света валентных  $\text{CH}$  и валентных  $\text{CO}$  колебаний всех исследованных молекул

Молекула	$\text{CH}_3\text{OH}$		$\text{CH}_4$		$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$		$\text{CH}_2\text{O}$	
	$\nu\text{CH}_{\text{sy}}$ m	$\nu\text{CO}$	$\nu\text{CH}_{\text{sy}}$ m	$\nu\text{CH}_{\text{a}}$ s	$\nu\text{CH}_{\text{s}}$ ym	$\nu\text{CO}$	$\nu\text{CH}_{\text{s}}$ ym	$\nu\text{CO}$
Максимум, $\text{cm}^{-1}$	2846	1033	2914	3017	2943	1079	2766	1746
Дифференциальное сечение, $10^{30}\text{cm}^2$	14				19			3,8

По данным Таблицы 1 был сделан вывод о том, что зондирование молекул метанола может быть реализовано по двум выбранным полосам валентных  $\text{CH}$  и  $\text{CO}$ .

### Лидар комбинационного рассеяния света.

Для регистрации спектра комбинационного рассеяния света рассмотрим моностатическую оптическую схему варианта лидара из [2, 9].

В качестве возможных вариантов рассмотрим использование второй гармоники  $\text{YAG:Nd}$ - лазера с длиной волны 532 нм и полупроводниковых лазеров с длинами волн 405 и 655 нм с длительностью импульсов 10 нс и энергиями в импульсе до 100 мкДж при частоте следования лазерных импульсов  $f$  до 100 кГц [2].

Излучение лазера направлялось вдоль оси приемного телескопа, а излучение комбинационного рассеяния молекулами метанола в атмосферном пограничном слое в направлении назад собиралось приемным телескопом типа Ньютона со сферическим зеркалом диаметром 400 мм и фокусировалось линзовым объективом в волоконный ввод микро спектрометра типа  $FSD-8$ , работающего под управлением ПК.

### Лидарное уравнение для комбинационного рассеяния света.

Лазер лидара будем характеризовать числом фотонов  $n_0$  в импульсе посылаемого в атмосферу лазерного излучения длительностью  $\tau_0$ , а линию генерации лазера будем считать Гауссовой с максимумом на частоте  $\nu_0$  и полушириной  $\Gamma_0$ . Тогда число фотонов  $n(\nu, z)$  излучения комбинационного рассеяния света исследуемыми молекулами метанола с концентрацией  $N(z)$  на фотоприемнике лидара можно получить из лидарного уравнения в направлении назад в режиме счета фотонов в виде [2, 9, 10] как интеграл в интервале от  $(\nu_0 - \Gamma_0)$  до  $(\nu_R + \Gamma_R)$ :

$$n(\nu, z) = \frac{c\tau_0}{2z^2} n_0 S_0 G(z) N(z) f t_d (d\sigma / d\Omega) \int_{\nu_0 - \Gamma}^{\nu_R + \Gamma_a} \Phi(\nu') \exp\left[-\int_0^z \{\alpha(\nu_0, r) + \alpha(\nu_R, r)\} dr\right] A(\nu') d\nu' \quad (1)$$

где  $n(\nu, z)$  – число фотонов, зарегистрированное фотодетектором лидара на частоте  $\nu_R$  комбинационного рассеяния света с расстояния зондирования  $z$ ;  $n_0$  – число фотонов на частоте  $\nu_0$  лазерного излучения, которое определяется выражением:  $n_0 = E_0 / h\nu_0$ , где  $E_0$  – энергия импульса лазерного излучения длительностью  $\tau_0$  в отличии от  $\tau_1$  – времени одного измерения или длительности синхроимпульса и  $h$  – постоянная Планка. Кроме того, обозначены  $S_0$  – площадь приемной апертуры телескопа;  $G(z)$  – геометрическая функция лидара [2, 5] и лежит в пределах  $0 < G(z) < 1$ . Следующие величины  $N(z)$  – концентрация исследуемых молекул;  $t_d$  – время измерения или накопления сигнала;  $(d\sigma / d\Omega)$  – дифференциальное сечение комбинационного рассеяния света исследуемыми молекулами; следующая экспонента – это пропускание атмосферы [2, 11] с коэффициентами ослабления  $\alpha(\nu_0, r)$  и  $\alpha(\nu_R, r)$  на частотах лазерного излучения и комбинационного рассеяния света молекулами метанола;  $\Phi(\nu)$  – функция Гаусса для распределения фотонов лазерного излучения в линии генерации [12]. Когда полуширина линии генерации много меньше, чем полуширина аппаратной функции лидара можем считать что  $\Phi(\nu) = 1$ . Кроме того, будем считать, что аппаратная функция или спектральный коэффициент пропускания приемной системы лидара  $A(\nu)$  [2, 5, 10] также описывается функцией Гаусса и настроена точно на частоту  $\nu_R$  полосы комбинационного рассеяния света молекулами метанола с полушириной  $\Gamma_a$ , которая больше чем  $\Gamma_R$  и  $\Gamma_0$ :

$$A(\nu) = \frac{K_I \xi(\nu)}{\sqrt{2\pi}\Gamma_0} \exp\left\{-\frac{(\nu - \nu_R)^2}{2\Gamma_a^2}\right\} \quad (3)$$

где  $K_I$  – лидарная константа на частоте  $\nu_0$  лазерного излучения, измеренная экспериментально в [13];  $\xi(\nu_R)$  – относительная спектральная чувствительность фотоприемника на частоте  $\nu_R$  излучения комбинационного рассеяния света. Предположение о том, что полуширина аппаратной функции на порядок больше, чем полуширина линии генерации лазера, вполне допустимо для промышленных лазеров и спектрометров [2]. Тогда перепишем уравнение (1) в виде

$$n(\nu, z) = \frac{B}{z^2} N(z) t_d I(\nu, z) \quad (4)$$

в котором обозначена константа  $B$  как

$$B = \frac{c\tau_0}{2} S_0 f \quad (5)$$

и некоторая функция частоты и расстояния зондирования  $I(\nu, z)$ , имеющая вид

$$I(\nu, z) = G(z) n_0 \int_{\nu_0 - \Gamma}^{\nu_R + \Gamma_a} (d\sigma / d\Omega) \exp\left[-\int_0^z \{\alpha(\nu_0, r) + \alpha(\nu_R, r)\} dr\right] A(\nu') d\nu' \quad (6)$$

Сделаем некоторые преобразования, вынеся дифференциальное сечение комбинационного рассеяния света (оно выступает как молекулярная константа) и экспоненту из-под интеграла и получим

$$I(v, z) = G(z)n_0(d\sigma/d\Omega)\exp\left[-\int_0^z\{\alpha(v_0, r) + \alpha(v_R, r)\}dr\right]\int_{v_0-\Gamma}^{v_R+\Gamma_a} A(v')dv' \quad (7)$$

Последний интеграл может быть преобразован с учетом интеграла ошибок [10] в произведение

$$\begin{aligned} \int_{v_0-\Gamma}^{v_R+\Gamma_a} A(v')dv' &= \frac{K_1\xi(v)}{\sqrt{2\pi}\Gamma_a} \int_{v_0-\Gamma}^{v_R+\Gamma_a} \exp[-(v-v_R)^2/(2\Gamma_a^2)]dv = \\ &= \operatorname{erf}(1/\sqrt{2})K_1\xi(v) = \frac{K_1\xi(v)}{2} \cdot 0.68269 = 0.34K_1\xi(v) \end{aligned} \quad (8)$$

Тогда выражение (7) с учетом (8) перепишем в виде

$$I(v, z) = G(z)n_0(d\sigma/d\Omega) \cdot 0.34K_1\xi(v)\exp\left[-\int_0^z\{\alpha(v_0, r) + \alpha(v_R, r)\}dr\right] \quad (9)$$

Теперь из уравнения (4) выразим концентрацию  $N(z)$  в виде

$$N(z) = \frac{n(v, z)z^2}{Bt_d I(v, z)} \quad (10)$$

с учетом (5) и (9).

### Результаты решения лидарного уравнения и обсуждение.

Рассмотрим однократное комбинационное рассеяние света и однородную атмосферу [2, 5, 12]. Значения максимумов полос валентных симметричных СН и валентных СО колебаний молекулы СН<sub>3</sub>ОН взяты из [2, 6, 7, 8] и равны 2846 и 1033 см<sup>-1</sup>. Значения дифференциального сечения полос комбинационного рассеяния света молекулы метанола ( $d\sigma/d\Omega$ ) для выбранных длин волн лазерного излучения 405, 532 и 655 нм были оценены по данным [5, 8], которые представлены в последней строке Таблицы 2. Рассчитанные с учетом зависимости  $1/\lambda^4$  как в [4] значения для интересующих нас длин волн приведены в таблице 2. Значения коэффициентов ослабления для этих частот  $\alpha(v_0, z)$  и  $\alpha(v_R, z)$  из [13, 14] также собраны в таблице 2. Поперечное сечение зеркала приемного телескопа лидара было 0.12 м<sup>2</sup>. а шаг по расстоянию –7,5 м для времени одного измерения 50 нс, за которое может быть зарегистрировано 200 фотонов. Лидарная константа  $K_l$  определялась как произведение спектрального пропускания приемного телескопа на величину относительной спектральной чувствительности фотоприемника  $\xi(\lambda)$  на длине волны  $\lambda$  [2, 13] из таблицы 2.

Таблица 2. Длины волн лазерного излучения и полос КРС молекул метанола, дифференциальные сечения колебательного комбинационного рассеяния света для двух полос, коэффициенты ослабления в атмосфере на этих длинах волн и относительная спектральная чувствительность фотоприемника.

Длины волн, nm	Дифференциальное сечение КРС ( $d\sigma/d\Omega$ ) $10^{30} \text{ см}^2$		Коэффициент ослабления		Относительная спектральная чувствительность ФП $\xi(\lambda)$
	CO $1033 \text{ см}^{-1}$	CH sym $2846 \text{ см}^{-1}$	$\alpha_a(\lambda_0, z)$ , $\text{км}^{-1}$	$\alpha_a(\lambda, z)$ , $\text{км}^{-1}$	
655	0,27	0,99	0,14		
703				0,11	0,28
805				0,106	0,25
532	0,61	2,26	0,16		
563				0,15	0,48
627				0,136	0,42
405	1,82	6,72	0,24		
423				0,21	0,8
458				0,173	0,84
337,1	3,8	14,0			

Для начала построим зависимость времени измерения  $t_d$  как меру эффективности нашего варианта лидара от расстояния зондирования  $z$  для концентрации молекул  $N(z) = 10^{16} \text{ см}^{-3}$  и заданных параметров лидара. Рассмотрим численное решение уравнения (10) в предположении, что  $G(H)$  для нашего случая равно 1, и за время измерения будут зарегистрированы 200 фотонов. Результаты решения уравнения (10) для этого случая представлены на рис. 1.

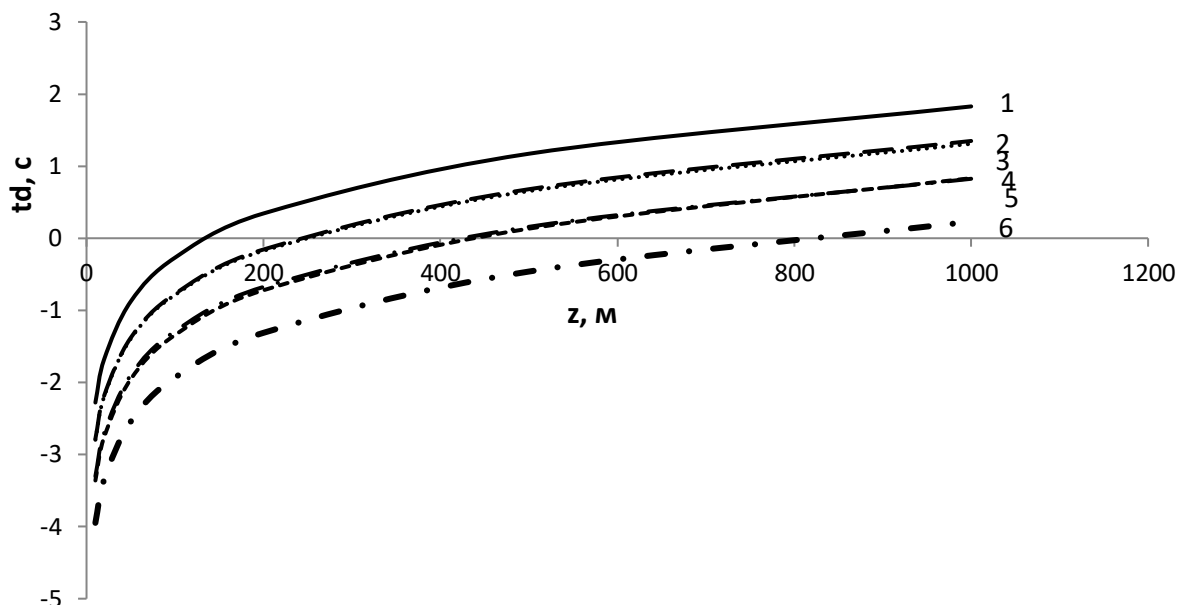


Рис. 1. Графики логарифмической зависимости времени измерения  $t_d$  (в с) от расстояния зондирования  $z$  (в м) для концентрации метанола  $N(z) = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

На рис. 1 представлены результаты для длин волн лазерного излучения 655 (1 и 3), 532 (2 и 4) и 405 (5 и 6) нм, причем кривые 2 и 3 и кривые 4 и 5 практически совпали. Расчеты выполнены для полос симметричного валентного CH колебания (3, 4 и 6) и валентного CO колебания (1, 2 и 5) молекулы метанола. Как следует из

графиков рис. 1, спектральные зависимости величин, входящих в уравнение (10), приводят к минимальному значению времени измерения концентрации исследуемых молекул  $N(z) = 10^{16} \text{ см}^{-3}$  на всех расстояниях зондирования для полосы симметричного валентного  $CH$  колебания молекулы  $CH_3OH$  (кривые 3, 4 и 6) и увеличению этого значения для полосы валентного  $CO$  колебания (1, 2 и 5) для каждой длины волны лазерного излучения, причем на первых 100 м это значение растет в ряду 11,7 мс - 51,2 мс - 163 мс.

Минимальное время измерения можно получить на длине волны 405 нм: для 50 м это значение составит 2,86 мс, для 100 м - 11,7 мс, для 500 м - 345 мс и для 1 км - 1,7 с при частоте следования лазерных импульсов 100 кГц и времени одного измерения 50 нс (шага по высоте  $\Delta H = 7,5$  м). Очевидно, что уменьшение времени измерения возможно за счет увеличения частоты следования лазерных импульсов или увеличения их энергии.

Теперь получим зависимость измеренной лидаром концентрации исследуемых молекул от расстояния зондирования  $z$  для времени измерения  $t_d = 1$  с.

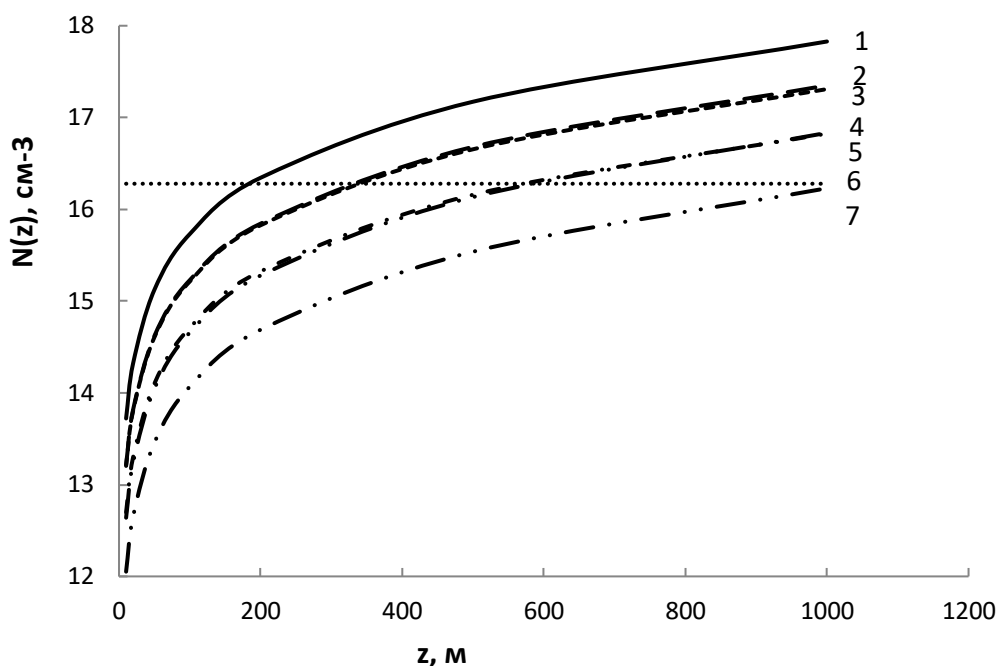


Рис. 2. Графики логарифмической зависимости концентрации  $N(z)$  (в  $\text{см}^{-3}$ ) от расстояния зондирования  $z$  (в м). Прямая 6 – это уровень ПДК  $= 1,9 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

Для полос симметричного валентного  $CH$  колебания (3, 4 и 7) и валентного  $CO$  колебания (1, 2 и 5) молекулы метанола для длин волн лазерного излучения 655 (1 и 3), 532 (2 и 4) и 405 (5 и 7) нм при зондировании в атмосфере метанола и времени измерения  $t_d = 1$  с.

На рис. 2 расчеты выполнены для длин волн лазерного излучения 655 (1 и 3), 532 (2 и 4) и 405 (5 и 7) нм, причем кривые 2 и 3 и кривые 4 и 5 практически совпали. Так же как и ранее представлены результаты для полос симметричного валентного  $CH$  колебания (3, 4 и 6) и валентного  $CO$  колебания (1, 2 и 5) молекулы метанола. На рис. 2 приведены результаты решения уравнения (10) для концентрации молекул метанола от  $10^{12} \text{ см}^{-3}$  до  $10^{18} \text{ см}^{-3}$  и диапазона расстояний зондирования до 1000 м и времени измерения 1 с. Сравнение с уровнем ПДК (прямая 6) показывает, что только использование лазерного излучения с длиной волны 405 нм позволит зарегистрировать такую концентрацию на расстоянии зондирования до 1 км при зондировании в полосе симметричного валентного  $CH$

колебания молекулы метанола, по полосе валентного  $CO$  колебания – только до 600 м.

### **Выводы**

Таким образом, анализ полученных результатов показывает, что за время измерения 1 с лидаром комбинационного рассеяния света с выбранными параметрами на длине волны лазерного излучения 405 нм можно зондировать молекулы метанола с уровнем концентрации порядка  $10^{16}$  см<sup>-3</sup> на расстояниях до 600 м. Полученные результаты хорошо согласуются с данными [5] и отражают различие в уровнях ПДК исследованных молекул углеводов [2], а разработка новых вариантов лидаров, например [15], открывает потенциальные возможности для дистанционного зондирования низких концентраций молекул метанола в атмосфере над промышленным предприятием.

### **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. Новый вид топлива сулит России большие прибыли. 17 февраля 2020. [Электронный ресурс] Режим доступа: [https://yandex.ru/turbo?promo=navbar&utm\\_referrer=https%3A%2F%2Fzen.yandex.com&utm\\_campaign=dbr&text=https%3A%2F%2Fvz.ru%2Fnews%2F2020%2F2%2F17%2F1024248.html](https://yandex.ru/turbo?promo=navbar&utm_referrer=https%3A%2F%2Fzen.yandex.com&utm_campaign=dbr&text=https%3A%2F%2Fvz.ru%2Fnews%2F2020%2F2%2F17%2F1024248.html)
2. Привалов В. Е., Фотиади А. Э., Шеманин В. Г. Лазеры и экологический мониторинг атмосферы. СПб.: Лань, 2013. 288 с.
3. 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.
4. Креков Г.М., Крекова М.М., Суханов А.Я., Лысенко А.А. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. Вып. 15. С.8.
5. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир. 1987. 550 с.
6. Свердлов Л. М., Ковнер М. А., Крайнов Е.П. Колебательные спектры многоатомных молекул, М.: Наука, 1970.
7. Ismail NakkiBoyaci, HüseyinEfeGenis, BurcuGüven, UgurTamerb, NeslihanAlperc. //J. Raman Spectrosc. 2012. 6 p. doi 10.1002/jrs.3159
8. Лазерный контроль атмосферы. /Под. ред. Хинкли Э.Д..М.: Мир. 1979.
9. Привалов В. Е., Шеманин В.Г. //Измерительная техника. 2016. № 9. С. 22.
10. Привалов В. Е., Шеманин В.Г. // Известия РАН. Серия физическая. 2015. Т.79. Вып. 2. С. 170.
11. Донченко В.А., Кабанов М.В., Кауль Б.В., Самохвалов И.В. Атмосферная электрооптика. Томск: Изд-во НТЛ. 2010. С. 178-181
12. Долгих Г.И., Привалов В.Е. Лазеры. Лазерные системы. Владивосток: Изд. Дальнаука, 2009. 202 с.
13. Привалов В.Е., Шеманин В.Г. Параметры лидаров для дистанционного зондирования газовых молекул и аэрозоля в атмосфере. С-Пб.: Балт. ГТУ. ВОЕНМЕХ. 2001. 57 с.



14. Справочник по лазерам. /Под ред. Прохорова А. М. Т. I. М.: Советское Радио. 1978. 504 с.
- 15.Привалов В. Е., Шеманин В. Г. // Оптика и спектроскопия, 2018. Т.125, Вып. 4. С. 568. doi: 10.21883/OS.2018.10.46714.129-18

## METHANOL MOLECULES IN ATMOSPHERE remote sensing BY Raman SPECTRA

V.E. Privalov<sup>1\*</sup>, V.G. Shemanin<sup>2,3</sup>

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

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

<sup>3</sup>Novorossiysk Polytechnic Institute of Kuban State Technological University, Russia

\*e-mail:vaevpriv@yandex.ru

The results of lidar equation for Raman back scattering by methanol molecules probing in atmosphere numerical solution at the concentration in the range of  $10^{12}\text{cm}^{-3}$ ...  $10^{18}\text{cm}^{-3}$  at the ranging distances up to 1000 m and the synchronous photon counting mode. It has been shown that during the measurement of 1 s Raman lidar at the 405 nm laser radiation wavelength of, methanol molecules with a concentration level of the order of  $10^{16}\text{cm}^{-3}$  can be probed at distances up to 600 m.

**Keywords:** lidar, equation, combinational light scattering, molecule, methanol, concentration, photon count.

### References

1. New type of fuel promises Russia big profits. February 17, 2020. [Electronic resource] Access mode: [https://yandex.ru/turbo?promo=navbar&utm\\_referrer=https%3A%2F%2Fzen.yandex.com&utm\\_campaign=dbr&text=https%3A%2F%2Fvz.ru%2Fnews%2F2020%2F%2F17%2F1024248.html](https://yandex.ru/turbo?promo=navbar&utm_referrer=https%3A%2F%2Fzen.yandex.com&utm_campaign=dbr&text=https%3A%2F%2Fvz.ru%2Fnews%2F2020%2F%2F17%2F1024248.html)
2. Privalov V. E., Fotiadi A. E., Shemanin V. G. Lasers and environmental monitoring of the atmosphere. St. Petersburg: Lan, 2013. 288 p.
3. Hygienic standards GN 2.1.6.3492-17 (as amended on May 31, 2018). Maximum permissible concentrations (MPC) of pollutants in the atmospheric air of urban and rural settlements.
4. Krekov G.M., Krekova M.M., Sukhanov A.Ya., Lysenko A.A. // Letters to JTF. 2009. Vol. 35. Issue. 15. P.8.
5. Mezheris R. Laser remote sensing. Moscow: Mir.1987. 550 p.
6. Sverdlov L.M., Kovner M.A., Kraynov E.P. Vibrational spectra of polyatomic molecules, Moscow: Nauka, 1970.
7. Ismail Hakki Boyaci, Hüseyin Efe Genis, Burcu Guven, Ugur Tamer b, Neslihan Alperc. // J. Raman Spectrosc. 2012. 6 p. doi 10.1002/jrs.3159
8. Laser monitoring of the atmosphere. / Ed. Hinkley E.D..M.: Mir. 1979.
9. Privalov V.E., Shemanin V.G. // Measuring equipment. 2016. No. 9. P. 22.
10. Privalov V.E., Shemanin V.G. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physical series. 2015. Vol. 79. Issue 2. P. 170.
11. Donchenko V.A., Kabanov M.V., Kaul B.V., Samokhvalov I.V. Atmospheric electro-optics. Tomsk: NTL Publishing House. 2010. P. 178-181

12. Dolgikh G.I., Privalov V.E. Lasers. Laser systems. Vladivostok: Dalnauka Publ., 2009. 202 p.
13. Privalov V.E., Shemanin V.G. Parameters of lidars for remote sensing of gas molecules and aerosol in the atmosphere. St. Petersburg: Balt. GTU. VOENMEKH. 2001. 57 p.
14. Handbook of lasers. / Ed. Prokhorov A.M.T. I. Moscow: Sovetskoe Radio. 1978. 504 p.
15. Privalov V.E., Shemanin V.G. // Optics and spectroscopy, 2018. Vol. 125, Issue. 4. P. 568. doi: 10.21883/OS.2018.10.46714.129-18

УДК 551.510  
ГРНТИ 29.33.27  
БАК 1.3.19

### **Оценка дисперсного состава цементного аэрозоля по результатам лазерного зондирования**

Половченко С.В.<sup>1</sup>, Привалов В.Е.<sup>2</sup>, Чартий П.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Новороссийский политехнический институт (филиал) Кубанского  
государственного технологического университета, г. Новороссийск, Россия*

<sup>2</sup>*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г.  
Санкт-Петербург, Россия*

e-mail: [polosveta@mail.ru](mailto:polosveta@mail.ru), [vaevpriv@yandex.ru](mailto:vaevpriv@yandex.ru), [pvc-60@yandex.ru](mailto:pvc-60@yandex.ru)

Выполнена оценка метода дифференциального ослабления для дистанционного измерения параметров аэрозольных загрязнений в атмосферном пограничном слое над цементным предприятием. Сигналы ослабления лазерного излучения на трех длинах волн были измерены на разработанной аэрозольной лидарной системе, по результатам которых были получены средние значения объемно-поверхностного диаметра аэрозольных частиц цемента. Вычислено среднее значение такого диаметра  $a_{32} = 0,61 \pm 0,04$  мкм с относительной погрешностью 11%.

*Ключевые слова:* дифференциальное ослабление, аэрозольное загрязнение, цементное предприятие, лазерное излучение, длина волны, средний объемно-поверхностный диаметр, частицы цемента.

Интенсивность, концентрация и количество факторов антропогенного воздействия на окружающую среду постоянно увеличиваются. Все это вызывает необходимость определения реальных объемов загрязнения атмосферы, ее состояния над конкретными объектами и районами, изучения геохимии и масштабов массопереноса в атмосферном пограничном слое, разработки передовых интеллектуальных технологий и лазерных роботизированных систем, позволяющих вести непрерывный мониторинг технологических процессов и состояния окружающей среды [1]. На это направлено Распоряжение

Правительства РФ от 13.03.2019 об оснащении предприятий-объектов неблагоприятного воздействия на окружающую среду первой категории автоматическими системами непрерывного контроля выбросов и передачи информации о них в Госреестр [2]. Для мониторинга аэрозольного загрязнения атмосферы измеряемыми параметрами являются концентрация и характеристики дисперсного состава взвешенных частиц [3].

Поэтому целью настоящей работы является оценка лидарного метода дифференциального ослабления для дистанционного измерения параметров дисперсного состава аэрозольного загрязнения атмосферы над предприятием цементного производства.

Дисперсный состав аэрозолей выражается через функцию распределения частиц по размерам. Сегодня наиболее целесообразным является разработка системы лазерного зондирования аэрозольных потоков или аэрозольного лидара дифференциального ослабления и рассеяния, которая позволит получать распределение аэрозольных частиц по размерам в атмосфере по высоте над землей в режиме реального времени. Оптическая схема такого лидара построена на основе [1, 4]. В нашей экспериментальной ситуации лидар дифференциального ослабления и рассеяния подразумевает использование трехволнового излучателя, перекрывающего весь диапазон размеров частиц [5]. В качестве возможного варианта рассмотрим использование лазерного излучения на трех длинах волн - двух полупроводниковых лазеров с длинами волн 405 и 655 нм и YAG:Nd лазера с длиной волны 1064 нм с длительностью импульсов 100 нс и средней мощности до 10 мВт при частоте следования лазерных импульсов  $f$  до 100 кГц [4]. Это излучение трех лазеров направлялось вдоль оси приемного телескопа в атмосферу. Прошедшее слой атмосферы зондирующее излучение на каждой длине волны ослаблялось за счет рассеяния Ми на аэрозольных частицах [4, 6], а отраженное уголковым отражателем назад излучение собиралось телескопом типа Ньютона со сферическим зеркалом диаметром 0,12 м и фокусировалось линзовым объективом в интерференционные светоделители, которые создавали три луча, причем каждый направлялся через соответствующий интерференционный фильтр на свой фотоприемник, напряжение с которого записывалось платой сбора данных в ПК.

Метод дифференциального ослабления и рассеяния основан на измерении спектрального коэффициента пропускания аэрозольного потока в некотором диапазоне волн [5]. При прохождении зондирующего излучения с длиной волны  $\lambda$  через слой толщиной  $l$ , состоящей из равномерно распределенных в измерительном объеме монодисперсных частиц с диаметром  $a$  со счетной концентрацией  $C_n$ , происходит его ослабление за счет рассеяния и поглощения [6]. Интенсивность прошедшего света в этом случае определяется в соответствии с законом Бугера - Ламберта-Бера [4] и в случае полидисперсного аэрозоля интенсивность прошедшего света может быть представлена в виде [6]

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp \left[ - \frac{\pi C_n l}{4} \int_0^{\infty} Q(\alpha, \lambda, m) a^2 f(a) da \right], \quad (1)$$

где  $Q(\alpha, \lambda, m)$  – фактор эффективности ослабления отдельной частицей.

Метод дифференциального ослабления применим в области, где зависимость фактора эффективности ослабления от  $\lambda$  наиболее сильно выражена (в области до первого максимума функции  $Q$ ). Техническая реализация метода требует применения не менее трех лазеров. Преимуществом метода является возможность получения информации о малых частицах (диапазон измеряемых радиусов находится в пределах от 0,05 мкм до 5 мкм) [7]. Этот метод используется для определения функции распределения частиц по размерам [5, 7]. Он основан на

измерении спектрального коэффициента пропускания  $\tau_\lambda$  для двух фиксированных длин волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  излучения зондирующего лазера, а отношение экспериментально измеренных оптических толщ на двух длинах волн равно отношению усредненных факторов эффективности ослабления и представляет собой функцию среднего объемно-поверхностного диаметра частиц:

$$\frac{\tau_{\lambda i}}{\tau_{\lambda j}} = \frac{\overline{Q}(a_{32}, \lambda_i, m)}{\overline{Q}(a_{32}, \lambda_j, m)} = F_{ij}(a_{32}) \quad (2)$$

По экспериментально измеренным  $\tau_{\lambda i}$  на трех длинах волн можно определить среднее значение  $a_{32}$ . А по этому значению  $a_{32}$  согласно процедуре, развитой в [8], можно восстановить функцию распределения аэрозольных частиц по размерам.

Экспериментальная проверка этого метода и соответствия рассчитанных отношений  $Q_i/Q_j$  с экспериментально измеренным отношением  $\tau_i/\tau_j$  была выполнена на примере цементного аэрозоля и результат временной динамики лидарных сигналов приведен на рис. 1.

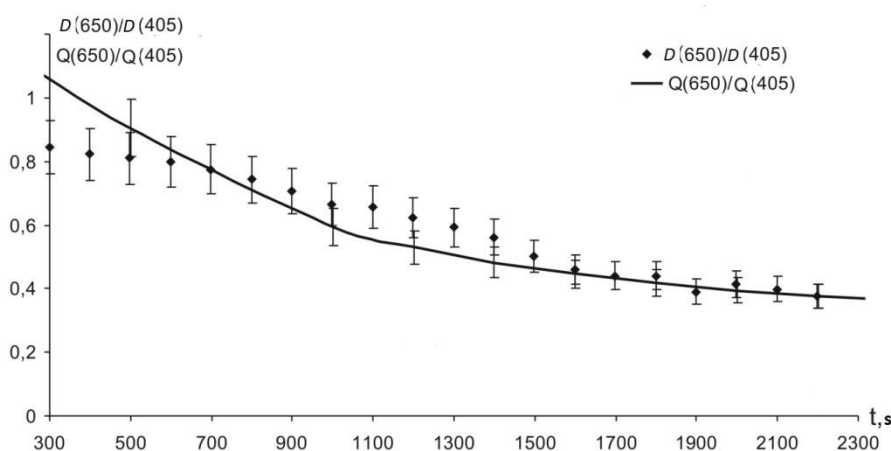


Рисунок 1 - Графики временной зависимости отношения  $Q_i/Q_j$  от  $t_i/t_j$  для длин волн лазерного излучения 650 и 405 нм и частиц цементного аэрозоля.

Из графика на рис. 1 видно, что рассчитанное отношение  $Q_i/Q_j$  и экспериментальное отношение  $\tau_i/\tau_j$  совпадают в пределах экспериментальной погрешности. Поэтому можно, измерив отношение  $\tau_i/\tau_j$ , найти по отношению  $Q_i/Q_j$  величину  $d_{32}$ . Полученная временная зависимость соответствует зависимости отношения величин  $Q_i/Q_j$  от  $a_{32}$  в диапазоне от 0,21 до 1 мкм. По этим данным для образца цементного аэрозоля на выходе рукавного фильтра величина  $d_{32}$  составляет 0.43 мкм в хорошем согласии с другими результатами [9]. Для каждой серии измерений было рассчитано среднее значение  $a_{32}$  по результатам измерений на трех длинах волн. Для нашей экспериментальной ситуации были измерены оптические плотности на трех длинах волн лазерного излучения и найдены отношения  $\tau_{650}/\tau_{405}$  и рассчитано значение  $d_{32} = 0.44 \pm 0.03$  мкм. Такая же процедура позволила получить для отношения  $\tau_{1064}/\tau_{405}$  значение  $d_{32} = 0.60 \pm 0.02$  мкм и для отношения  $\tau_{1064}/\tau_{650}$  значение  $d_{32} = 0.80 \pm 0.04$  мкм. В итоге было рассчитано среднее значение, которое составило  $d_{32} = 0.61 \pm 0.04$  мкм с относительной погрешностью  $\varepsilon = 11\%$ .

В итоге были измерены сигналы ослабления лазерного излучения на трех длинах волн на разработанной лазерной системе и по измеренным сигналам ослабления лазерного излучения были рассчитаны значения среднего объемно-поверхностного диаметра аэрозольных частиц цемента, по которым может быть восстановлена функция распределения аэрозольных частиц по размерам [8].

Таким образом, на предприятиях с механической активацией вещества и получения дисперсных материалов, например, при производстве цемента, использование предложенного аэрозольного лидара дифференциального ослабления и рассеяния позволит создать автоматическую систему непрерывного контроля выбросов аэрозольных частиц.

### **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. Дьяченко В.В., Чартий П.В., Чартий Р.П., Шеманин В.Г. Контроль аэрозолей в приземном слое атмосферы в реальном времени // Безопасность в техносфере. 2008. № 3. С. 36-43.
2. Максимов В.В. Системы непрерывного контроля выбросов. // Экология производства. 2018. Ноябрь. С. 48-57
3. Дьяченко В.В., Роговский В.В., Чартий П.В. Контроль экологической безопасности пылегазоочистных установок модифицированным методом спектральной прозрачности // Безопасность в техносфере. 2014. № 4. С.17-22 14
4. Привалов В.Е., Фотиади А.Э., Шеманин В.Г. Лазеры и экологический мониторинг атмосферы. СПб.: «Лань», 2013. 288 с.
5. Архипов В.А., Ахмадеев И.Р., Бондарчук С.С., Ворожцов Б.И., Павленко А.А., Потапов М.Г. Модифицированный метод спектральной прозрачности измерения дисперсности аэрозолей // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 20. № 1. С. 48-52.
6. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1986. 660 с.
7. Архипов В.А. Лазерные методы диагностики гетерогенных потоков. Томск: Изд-во Том. Ун-та, 1987. 140 с.
8. Половченко С.В., Привалов В.Е., Чартий П.В., Шеманин В.Г., Восстановление функции распределения частиц по размерам на основе данных многоволнового лазерного зондирования // Оптический журнал. 2016. Т.83. №5. С. 43-49.
9. Веденин Е.И., Половченко С.В., Чартий П.В., Шеманин В.Г. Изменение функции распределения частиц по размерам при различных режимах работы пылеулавливающего оборудования // Безопасность в техносфере. 2016. № 1(58). С.41-47.

### **Estimation of the dispersed composition of cement aerosol based on the results of laser sensing**

Polovchenko S.V.<sup>1</sup>, Privalov V.E.<sup>2</sup>, Charty P.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Novorossiysk Polytechnic Institute (branch) Kuban State Technological University, Novorossiysk, Russia*

<sup>2</sup>*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia*

e-mail: polosveta@mail.ru, vaevpriv@yandex.ru , pvc-60@yandex.ru

The laser differential extinction method evaluation for the remote measurement of aerosol pollution parameters in the atmosphere under the cement plant has been performed. The extinction signals of laser radiation at three wavelengths were measured using the developed aerosol lidar system, which resulted in the average values of the volume-surface diameter of aerosol cement particles. The average value of such a diameter  $d_{32} = 0.61 \pm 0.04$  microns with a relative error of 11% was calculated.

*Key words:* differential attenuation, aerosol contamination, cement plant, laser radiation, wavelength, average volume-surface diameter, cement particles.

## References

1. Dyachenko V.V., Chartiy P.V., Chartiy R.P., Shemanin V.G. Monitoring aerosols in the atmospheric ground layer in real time // Safety in the technosphere. 2008. No. 3. P. 36-43.
2. Maksimov V.V. Continuous emission monitoring systems // Production ecology. 2018. November. P. 48-57
3. Dyachenko V.V., Rogovskiy V.V., Chartiy P.V. Monitoring environmental safety of dust and gas cleaning plants using a modified spectral transparency method // Safety in the technosphere. 2014. No. 4. P. 17-22 14
4. Privalov V.E., Fotiadi A.E., Shemanin V.G. Lasers and environmental monitoring of the atmosphere. SPb.: "Lan", 2013. 288 p.
5. Arkhipov V.A., Akhmadeev I.R., Bondarchuk S.S., Vorozhtsov B.I., Pavlenko A.A., Potapov M.G. Modified method of spectral transparency of aerosol dispersion measurement // Optics of the atmosphere and ocean. 2007. Vol. 20. No. 1. Pp. 48-52.
6. Boren K., Huffman D. Absorption and scattering of light by small particles. Moscow: Mir, 1986. 660 p.
7. Arkhipov V.A. Laser methods for diagnostics of heterogeneous flows. Tomsk: Publishing house of Tomsk. University, 1987. 140 p.
8. Polovchenko S.V., Privalov V.E., Chartiy P.V., Shemanin V.G., Reconstruction of the particle size distribution function based on multiwave laser probing data // Optical Journal. 2016. Vol.83. No.5. Pp.43-49.
9. Vedenin E.I., Polovchenko S.V., Chartiy P.V., Shemanin V.G. Change in the particle size distribution function under different operating modes of dust collection equipment // Safety in the technosphere. 2016. No.1(58). Pp.41-47.

## ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

УДК 551.510  
ГРНТИ 29.31.27  
ВАК 1.3.19

### **Лазерная система для исследования распределения по размерам частиц аэрозоля методом дифференциального ослабления лазерного излучения**

<sup>1</sup>Веденин Е. И., <sup>1</sup> Сарычев И. А., <sup>1</sup>Сарычев П.И. <sup>1</sup>Чартий П. В.

<sup>1</sup>353900, Россия, г. Новороссийск, ул. Карла Маркса 20, Новороссийский политехнический институт (филиал) КубГТУ

e-mail: [pvc-60@yandex.ru](mailto:pvc-60@yandex.ru)

Построена автоматизированная многоволновая лазерная система для исследования зависимости лидарных сигналов от концентрации частиц и их распределения по размерам для зондируемого аэрозоля. Выполнены экспериментальные исследования зависимости лидарных сигналов от параметров функции распределения частиц цементного аэрозоля по размерам. Разработаны алгоритмы измерительных процедур и получены корреляционные зависимости измеренных экспериментально лидарных сигналов от концентрации частиц и их распределения по размерам.

**Ключевые слова:** лазерная система, длина волны лазерного излучения, лидарный сигнал, функции распределения частиц цементного аэрозоля по размерам

## **Введение**

Загрязнение атмосферного пограничного слоя над промышленными районами аэрозольными частицами очень актуально для юга России [1–4]. Учитывая повышенную роль атмосферного переноса в глобальном загрязнении контроль техногенной эмиссии особенно важен. Основная часть атмосферного загрязнения представлена аэрозолями различного происхождения. Эта роль аэрозолей в загрязнении атмосферы на юге России отмечалась неоднократно [5, 6] и заключается в том, что они не просто являются агентами загрязнения, но и сорбируют еще более мелкие частицы и молекулы на своей поверхности. Это характерно для наиболее тонкодисперсных аэрозолей, относящихся к классам PM10 и PM2.5 [7].

Методами лазерного зондирования установлены основные закономерности атмосферного аэрозоля, отмечена роль дефляции в образовании фонового аэрозоля и техногенных процессов - в появлении аномальных уровней загрязнения [5, 6, 8]. Эти аэрозоли характеризуются значительной полидисперсностью и высокими уровнями концентраций. Для контроля их параметров на сегодняшний день наибольшее распространение получили лазерные методы исследования аэрозолей [6, 8–10]. Такой выбор определен хорошо разработанной теорией распространения и взаимодействия электромагнитного излучения с различными средами и существованием большого количества промышленно выпускаемых разнообразных типов лазеров, оптических систем и их компонентов.

Существует много приборов, созданных для исследования параметров аэрозолей, однако большинство из них не отражают динамику характеристик объекта исследования и основаны на принципах пробоотбора. При использовании таких приборов необходимо при каждом измерении обеспечивать изокинетичность и представительность отобранной пробы, что неизбежно оказывает влияние на исследуемую среду. Существующие приборы, основанные на бесконтактных методах измерений, как правило, не отображают динамики характеристик аэрозольного облака, не дают информации о размерах частиц в широком диапазоне или применимы лишь к конкретным типам аэрозолей, либо сложны в исполнении, что существенно ограничивает их использование.

Целью настоящей работы является разработка автоматизированной многоволновой лазерной системы для исследования зависимости лидарных сигналов от концентрации частиц и их распределения по размерам для зондируемого аэрозоля. Для этого будут разработаны алгоритмы измерительных процедур для регистрации концентраций аэрозольных частиц и выполнены экспериментальные исследования зависимости лидарных сигналов от параметров функции распределения аэрозольных частиц по размерам. Эти корреляционные

зависимости измеренных экспериментально на автоматизированной многоволновой лазерной системе лидарных сигналов от концентрации частиц и их распределения по размерам для зондируемого аэрозоля.

### 1. Лазерный метод дифференциального ослабления

Для измерения параметров аэрозольных потоков была разработана лазерная система на основе метода дифференциального ослабления, позволяющая измерять сигналы ослабления на трех длинах волн. Сигналы ослабления представляют собой электрические сигналы фотоприемника прямо пропорциональные интенсивности ослабленного лазерного излучения.

Метод дифференциального ослабления основан на решении обратной задачи [11], которое можно представить в виде уравнения:

$$\tau_{\lambda} = \frac{\pi \cdot C_n \cdot l}{4} \cdot \int_0^{\infty} x^2 \cdot Q(x, \lambda, m) \cdot f(x) dx, \quad (1)$$

где  $\tau_{\lambda}$  – оптическая плотность;  $C_n$  – счетная концентрация частиц;  $\lambda$  – длина волны зондирующего излучения;  $Q$  – фактор эффективности ослабления для одиночных частиц;  $l$  – оптическая длина зондирования;  $x$  – диаметр частиц;  $m$  – комплексный показатель преломления материала частиц.

Усредненный фактор эффективности ослабления вычисляется по формуле:

$$\bar{Q}(x, \lambda, m) = \frac{\int_0^{\infty} x^2 \cdot Q(x, \lambda, m) \cdot f(x) dx}{\int_0^{\infty} x^2 \cdot f(x) dx}. \quad (2)$$

Массовая концентрация взвешенных частиц через счетную выражается формулой:

$$C_m = C_n \frac{\pi \cdot \rho_p}{6} \cdot \int_0^{\infty} x^3 \cdot f(x) dx. \quad (3)$$

При замене в уравнении (3) счетной концентрации на массовую получаем выражение:

$$\tau_{\lambda} = \frac{1,5 C_m \cdot l \cdot \bar{Q}(x, \lambda, m)}{\rho_p \cdot d_{32}}, \quad (4)$$

где  $\rho_p$  – плотность материала частиц.

Экспериментально измеренная оптическая плотность и рассчитанное значение среднего объемно-поверхностного диаметра частиц позволяют рассчитать массовую концентрацию по формуле:

$$C_m = \frac{\tau_{\lambda} \cdot \rho_p \cdot d_{32}}{1,5 l \cdot \bar{Q}(x, \lambda, m)}. \quad (5)$$

Физическая модель метода основана на взаимодействии монохроматического излучения с полидисперсной средой по теории Ми [12] и сохранения инвариантности усредненного фактора эффективности ослабления относительно вида функции распределения частиц по размерам [11, 13].

Средний объемно-поверхностный диаметр аэрозольных потоков определяется путем измерения оптической плотности исследуемого аэрозоля на нескольких длинах волн и вычисления усредненных факторов эффективности ослабления для этих длин волн. Отношение измеренных оптических плотностей на двух длинах волн равно отношению рассчитанных усредненных факторов эффективности ослабления и выражает функцию среднего размера частиц [11]:



$$\frac{\tau_{\lambda_i}}{\tau_{\lambda_j}} = \frac{\bar{Q}(x, \lambda_i, m)}{\bar{Q}(x, \lambda_j, m)} = F_{ij}(d_{32}). \quad (6)$$

Диапазон измерений средних размеров частиц определяется длинами волн зондирующего излучения.

## 2. Лазерная система дифференциального ослабления лазерного излучения

Для решения задачи восстановления функции распределения аэрозольных частиц по размерам и измерения их концентрации разработана экспериментальная лазерная система на основе моностатического лидара дифференциального ослабления. Оптическая схема такой лазерной системы представлена на рис. 1.

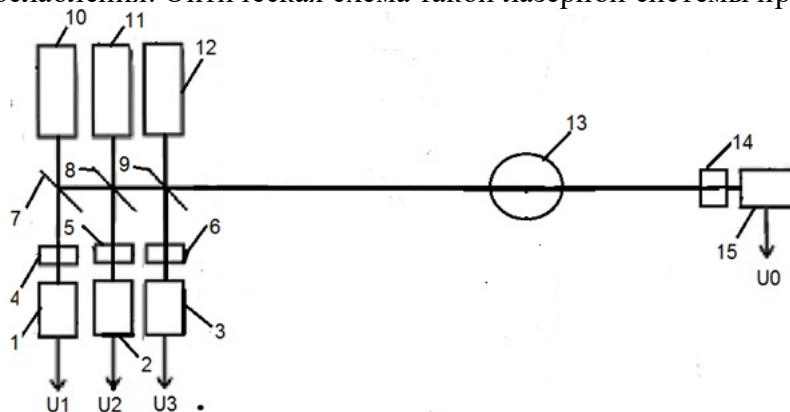


Рис. 1. Оптическая схема лазерной системы: 1, 2, 3, 15 – фотоприемники; 4, 5, 6, 14 –интер-ференционные светофильтры; 7, 8, 9 – светоделители; 10, 11, 12 – лазеры, 13 – аэрозольный поток

Через поток аэрозоля 13, сформированный на выходе газохода и проходящий перпендикулярно лазерному лучу, пропускались три луча лазеров 10, 11 и 12 с длинами волн 405, 650 и 1064 нм, которые в схеме дифференциального ослабления направлялись на один фотоприемник 15 со своей схемой обработки сигнала. Измеренные сигналы ослабления позволяют рассчитать средний объемно-поверхностный диаметр аэрозольных частиц цемента. Сигнал аэрозольного ослабления из измерительного объема 13, сформированного лабораторным генератором частиц цементного аэрозоля в воздушном потоке, регистрировался через интерференционный светофильтр 14 фотоприемником 15. Сигналы с выходов фотоприемников  $U_0$ ,  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$  и  $U_4$  регистрировались системой сбора данных, работающей на линии с ПК. В экспериментальной лазерной системе для определения только концентрации аэрозоля в качестве излучателя 12 использовалась вторая гармоника YAG–Nd лазера, работающий на длине волны 532 нм в непрерывном режиме с мощностью до 0,2 Вт.

Блок сбора данных включает в себя блок формирования, регистрации и обработки сигналов, состоящий из измерительных и опорных синхронных детекторов, усилителя мощности и генератора импульсов [14]. Синхронное детектирование измерительных сигналов предназначено для повышения чувствительности фотоприемного устройства.

Лазерами 10, 11 и 12 генерируется излучение на трёх длинах волн (405, 532 и 1064 нм) с частотой  $5 \cdot 10^3$  Гц. С целью выделения в модулированном излучении нужных длин волн на пути лазерных лучей размещены интерференционные светофильтры 4, 5 и 6.

Последовательности импульсов лазерного излучения проходят через светоделительные пластины 7, 8 и 9. Часть прошедшего через светоделители 7, 8

и 9 излучения поступает на опорные фотоприемники 1, 2 и 3, а основная часть излучения проходит сквозь аэрозольный поток 13.

Многочисленное отражение лазерных лучей от параллельно расположенных зеркал позволяет увеличить оптический путь проходимый лучами и таким образом увеличить ослабление лазерного излучения регистрируемого фотоприемником ослабленного излучения 15. Зеркала в описываемой лазерной системе установлены под углом, обеспечивающим прохождение лучами девяти проходов сквозь аэрозольный поток.

Проходящее сквозь аэрозольный поток излучение ослабляется и поступает на фотоприёмник ослабленного излучения 15, где и регистрируется.

Зарегистрированное фотоприёмником 8 излучение в форме электрических сигналов проходит через дифференциальный усилитель и синхронный детектор, после чего проходят повторное усиление дифференциальным усилителем. Электрический сигнал со второго дифференциального усилителя поступает на АЦП, где преобразуется в цифровой сигнал и далее поступает на обработку в ПК. Блок обработки сигналов использует шесть каналов аналогово-цифрового преобразователя.

Таким образом, разработана трех волновая лазерная система, которая позволяет измерять сигналы ослабления лазерного излучения методом дифференциального поглощения на трех длинах волн лазерного излучения на частицах аэрозоля.

### **3. Экспериментальное исследование зависимости сигналов ослабления от среднего объемно-поверхностного диаметра частиц**

Для экспериментального исследования зависимости сигналов ослабления от массовой концентрации и среднего объемно-поверхностного диаметра частиц методом дифференциального ослабления разработан экспериментальный генератор частиц цементного аэрозоля. Воздушный поток цементных частиц схожие по своим свойствам с потоками реального производства поступают в измерительный объем 13 перпендикулярно лазерному лучу (плоскости чертежа на рис. 1), а также изменяя параметры сгенерированных аэрозольных потоков исследовать зависимости лидарных сигналов от этих параметров.

Рассмотрим алгоритм проведения измерений. В интервале времени от 0 до 60 секунд осуществляется «нулевое» измерение. На этом этапе нагнетатель воздуха и питатель цементного порошка отключены, аэрозольный поток отсутствует. В интервале времени от 60 до 120 секунд включается нагнетатель воздуха, создающий воздушный поток, питатель цементного порошка отключен. Аэрозольный поток на данном этапе отсутствует, однако в воздушный поток попадает некоторое количество цементного порошка, высыпавшееся при размещении питателя в отверстии трубки Вентури, что выражается в залповом выбросе частиц при включении питателя. В интервале времени от 120 до 420 секунд включены нагнетатель воздуха и питатель цементного порошка. На данном этапе через измерительный объем лазерной установки проходит аэрозольный поток. Из-за спрессовывания цементного порошка поступление аэрозольного потока в измерительный объем лазерной установки происходит не в момент включения питателя (120 с), а через некоторое время. Устойчивый аэрозольный поток формируется в интервале от 180 до 200 секунд и продолжается до 380...400 секунд.

В промежутке от 420 до 480 секунд питатель отключен, нагнетатель воздуха включен. На данном этапе аэрозольный поток отсутствует, генерируется только воздушный поток, в который может попадать некоторое количество цементного порошка, оставшееся на стенках газохода после пропускания через него цементной пробы. В интервале времени от 480 до 540 секунд осуществляется

«нулевое» измерение. На данном этапе нагнетатель воздуха и питатель цементного порошка отключены, аэрозольный поток отсутствует (см. рис. 2). Регистрация сигналов ослабления осуществлялась посредством аналого-цифрового преобразователя LA50USB подключенного к ПК [4]. Запись сигналов ослабления с фотоприемника осуществлялась в программе ADClab. Сигналы записывались в виде значений напряжения в вольтах и в таком виде использовались для дальнейшей обработки и проведения расчетов массовой концентрации и среднего объемно-поверхностного диаметра аэрозольных частиц цемента.

Обработка измеренных сигналов заключается в усреднении, а для приведения графиков к первоначальному значению нулевого сигнала ликвидируется его смещение [7]. Графики сигналов ослабления, приведенные к первоначальному значению нулевого сигнала, представлены на рис. 2.

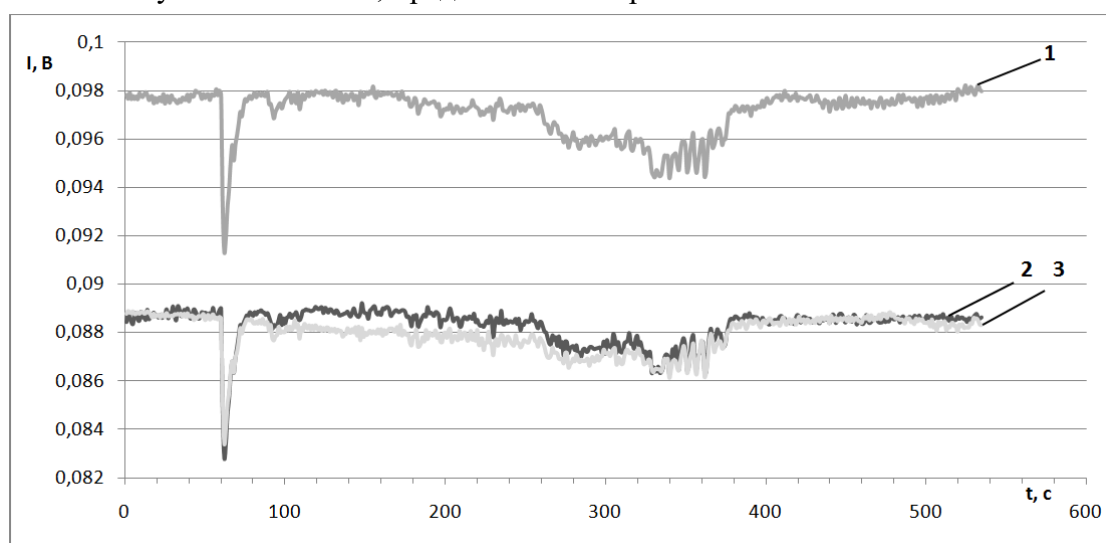


Рис. 2. График зависимости экспериментально измеренного сигнала ослабления от времени измерения после приведения к первоначальному значению нулевого сигнала для длин волн лазерного излучения: 1 – 650 нм; 2 – 1064 нм; 3 – 405 нм

На графике рис. 2 видно, что на участке от 165 до 400 с отмечается непрерывное ослабление сигнала в результате формирования устойчивого аэрозольного потока. По полученным сигналам ослабления можно рассчитать массовую концентрацию и средний объемно-поверхностный диаметр частиц [4, 7, 10]. Оценим возможность расчета массовой концентрации по измеренным сигналам. Измеренная оптическая длина зондирования  $l$  составила 493 мм. Масса цементного порошка  $m$  впрыскиваемого в ходе экспериментального измерения объемом  $V = 0,6$  мл составляет в среднем 0,51 г [7].

Среднее рассчитанное значение коэффициента ослабления для сигнала на длине волны 650 нм составило  $k_k = 0.174$ , для сигнала на длине волны 405 нм составило  $k_{\phi} = 0.250$ , для сигнала на длине волны 1064 нм составило  $k_{un} = 0.137$ . По этим средним значениям коэффициента ослабления рассчитаем массу пробы для каждой серии измерения. Рассчитанные массы для длины волны 650 нм составили значения от 0,491 до 0,551 г ( $m_{cp} = 0,51$  г), для длины волны 405 нм от 0,480 до 0,542 г ( $m_{cp} = 0,51$  г), для длины волны 1064 нм от 0,489 до 0,594 г ( $m_{cp} = 0,51$  г). По результатам расчетов относительная погрешность определения массы пробы цемента составляет 1,6 %.

По измеренным сигналам ослабления рассчитаем средний объемно-поверхностный диаметр аэрозольных частиц цемента. Средний объемно-поверхностный диаметр можно определить, исходя из зависимости усредненного фактора эффективности ослабления от среднего объемно-поверхностного

диаметра [14]. По рассчитанным зависимостям усредненного фактора эффективности ослабления на трех длинах волн от среднего объемно-поверхностного диаметра построены кривые зависимости отношения усредненных факторов эффективности на двух длинах волн от среднего объемно-поверхностного диаметра (рис. 3).

Исходя из формулы (6) рассчитанные кривые зависимости среднего объемно-поверхностного диаметра от отношения усредненных факторов эффективности на двух длинах волн применимы для отношения оптических плотностей на двух длинах волн. Для рассчитанных оптических плотностей на трех длинах волн были найдены отношения  $\tau_{\lambda_{650}}/\tau_{\lambda_{405}}$ ,  $\tau_{\lambda_{1064}}/\tau_{\lambda_{405}}$ ,  $\tau_{\lambda_{1064}}/\tau_{\lambda_{650}}$ . По построенным кривым зависимости среднего объемно-поверхностного диаметра от отношения усредненных факторов эффективности на двух длинах волн были определены значения среднего объемно-поверхностного диаметра частиц для каждого рассчитанного отношения оптических плотностей на двух длинах волн. Для каждой серии измерений было рассчитано среднее значение среднего объемно-поверхностного диаметра измеренного на трех длинах волн. Для полученных значений  $d_{32}$  было рассчитано среднее значение, которое составило  $d_{32} = 0,61$  мкм с относительной погрешностью 6,5 %.

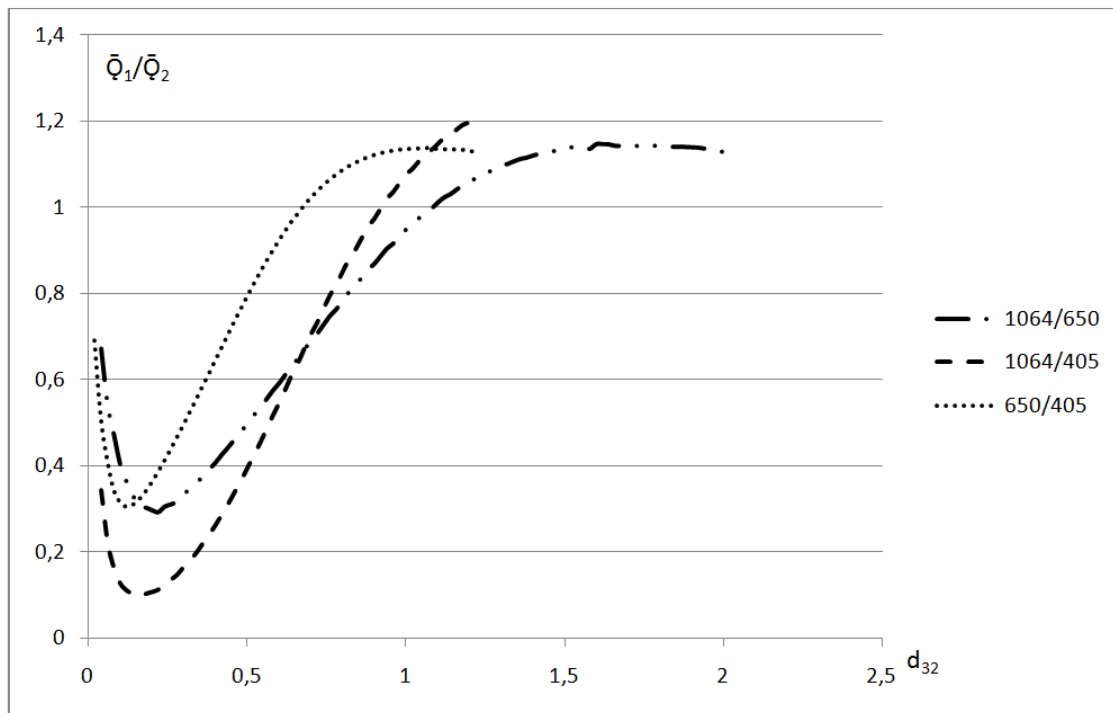


Рис. 3. Зависимость среднего объемно-поверхностного диаметра от отношения усредненных факторов эффективности на двух длинах волн

Затем было сопоставлено отношение  $\frac{\bar{Q}(\lambda_i)}{\bar{Q}(\lambda_j)}$  с экспериментально измеренным отношением  $\frac{\tau_{\lambda_i}}{\tau_{\lambda_j}}$ . На рис. 4 показаны графики рассчитанного отношения

$$\frac{\bar{Q}(\delta_{32,650,m})}{\bar{Q}(\delta_{32,405,m})} \text{ и измеренное отношение } \frac{\tau_{650}}{\tau_{405}}$$

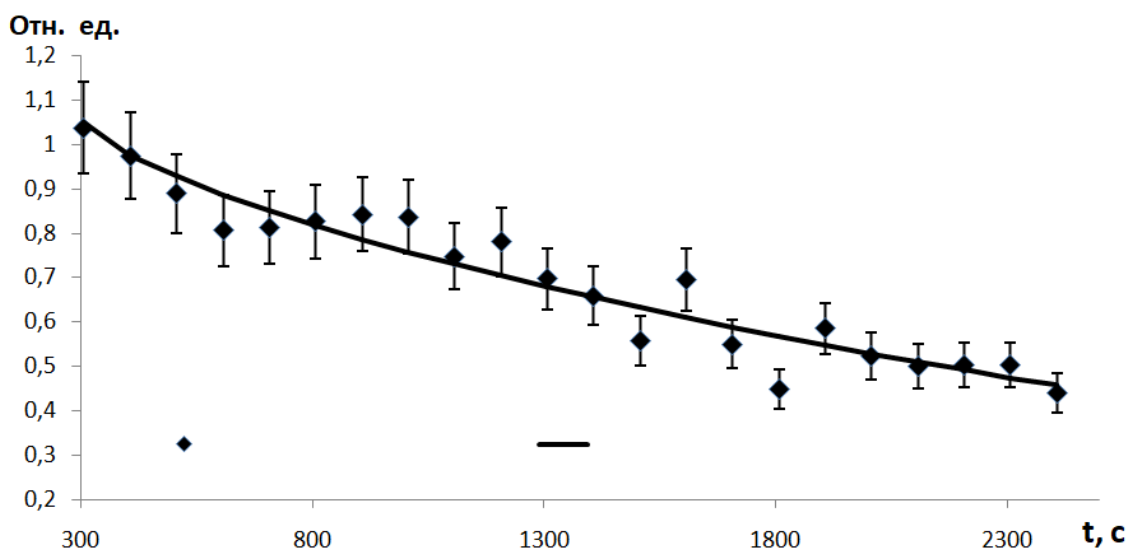


Рис. 4. Графики зависимости отношения  $\frac{\bar{Q}(\delta_{32,650,m})}{\bar{Q}(\delta_{32,405,m})}$  и  $\frac{\tau_{650}}{\tau_{405}}$  от времени после импульсной инжекции

По графикам на рис. 4 нетрудно заметить, что расчетное отношение  $\bar{Q}_{\lambda i}/\bar{Q}_{\lambda j}$  и экспериментальное отношение  $\tau_{\lambda i}/\tau_{\lambda j}$  совпадают в пределах заданной погрешности. Таким образом, по измеренному отношению оптических плотностей  $\tau_{\lambda i}/\tau_{\lambda j}$ , находим отношение усредненных факторов эффективности ослабления  $\bar{Q}_{\lambda i}/\bar{Q}_{\lambda j}$  и определяем величину  $d_{32}$ , пользуясь графиком на рис. 4.

Таким образом, разработанная экспериментальная лазерная система позволяет измерять в реальном времени сигналы ослабления лазерного излучения и рассчитывать по измеренным сигналам ослабления достоверные значения массовой концентрации и среднего объемно-поверхностного диаметра частиц с достаточной точностью.

#### 4. Регрессионные зависимости для функции распределения частиц по размерам.

По результатам исследования трансформации функций распределения частиц по размерам в потоке были получены функции распределения частиц в аэрозольном потоке [7, 14]. Между измеренным средним объемно-поверхностным диаметром и остальными средними значениями диаметров установлены регрессионные зависимости с коэффициентом детерминации не менее 0,85. Аппроксимируя полученные функции распределения частиц логарифмически-нормальным законом, можно определить его параметры по полученным линейным зависимостям для максимума распределения и его полуширины

$$x_p = 0,7723 \delta_{32} + 0,1430,$$

$$\sigma_p = -1,2409 \delta_{32} + 0,9793.$$

Таким образом, по этим результаты можно по измеренному среднему объемно-поверхностному диаметру возможно восстанавливать функцию распределения частиц по размерам для мелкодисперсного аэрозоля [15].

Предложенная методика определения среднего объемно-поверхностного диаметра по сигналам ослабления и рассеяния на трех длинах волн позволила выявить корреляционные зависимости между средним объемно-поверхностным диаметром и параметрами логарифмически-нормального закона распределения частиц по размерам, что подтверждено хорошим совпадением с экспериментальными данными [55].

## **5. Заключение.**

1 Создана экспериментальная автоматизированная четырехволновая лазерная система для измерения концентраций аэрозольных частиц и их распределения по размерам аэрозольных частиц в атмосферном пограничном слое по дифференциальному ослаблению и рассеянию лазерного излучения в видимой и ближней ИК области.

2 Разработаны алгоритмы измерительных процедур и соответствующее программное обеспечение для обработки данных лазерного зондирования [14, 15].

3 Получены корреляционные зависимости измеренных экспериментально лидарных сигналов от концентрации частиц и их распределения по размерам для зондируемого аэрозоля.

## **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. Дьяченко В. В. Региональные проблемы техносферной безопасности Северного Кавказа. Безопасность жизнедеятельности. 2003. № 2. С. 32–37.
2. Привалов В. Е., Фотиади А. Э., Шеманин В. Г. Лазеры и экологический мониторинг атмосферы. СПб.: Изд. Лань. 2012. 288 с.
3. Грин Х., Лейн В. Аэрозоли – пыли, дымы и туманы. Л.: Изд «Химия», ЛО, 1969. 428 с.
4. Веденин Е. И. Чартий П. В., Шеманин В. Г. Лазерная система предупреждения аэрозольных выбросов. Безопасность в техносфере. 2014. № 5(50) сентябрь–октябрь. С. 25–31.
5. Донченко В. А., Кабанов М. В., Кауль Б. В., Самохвалов И. В. Атмосферная электрооптика. Томск: Изд-во НТЛ. 2010. 220 с.
6. Веденин Е. И. Чартий П. В., Шеманин В. Г. Лазерная система предупреждения аварийных выбросов промышленных аэрозолей в атмосферу. Известия высших учебных заведений. Физика. 2013. Т. 56, № 8/3. С. 278–280.
7. Веденин Е. И., Половченко С. В., Чартий П. В., Шеманин В. Г. Изменение функции распределения частиц по размерам при различных режимах работы пылеулавливающего оборудования. Безопасность в техносфере. 2016. № 1(58). С. 41–47.
8. Зуев В. Е., Наац И. Э. Обратные задачи оптики атмосферы. Л.: Гидрометеиздат. 1990. 287 с.
9. Привалов В. Е., Шеманин В. Г. Учет ширины линии лазерного излучения в лидарном уравнении для комбинационного рассеяния света. Оптический журнал. 2015. Т. 82. № 9. С. 11–15.
10. Архипов В. А. Лазерные методы диагностики гетерогенных потоков. Томск : Изд-во Томского ун-та. 1987. 140 с.
11. Архипов В. А., Ахмадеев И. Р., Бондарчук С. С., Ворожцов Б. И., Павленко А. А., Потапов М. Г. Модифицированный метод спектральной прозрачности измерения дисперсности аэрозолей. Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 20, № 01. С. 48–52.

12. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир. 1986. 660 с.
13. Пришивалко А. П. Рассеяние света сферическими частицами и полидисперсными средами. А. П. Пришивалко, Е. К. Науменко: препринт ИФ АН БССР. Минск. 1972. Ч. 1. 61 с.
14. Половченко С. В., Привалов В. Е., Чартий П. В., Шеманин В. Г. Восстановление функции распределения частиц по размерам на основе данных многоволнового лазерного зондирования. Оптический журнал. 2016. Т. 83. № 5. С. 43–49.
15. Половченко С. В. Оптические характеристики полидисперсных систем в широком диапазоне изменения входящих параметров. Свидетельство государственной регистрации базы данных № 2014621475 от 22 октября 2014.

**Laser system for investigating aerosol flows by the method of differential attenuation and scattering of laser radiation in the visible and near-infrared regions**

<sup>1</sup>Vedenin E. I., <sup>1</sup>Sarychev I. A., <sup>1</sup>Sarychev P.I., <sup>1</sup>Chartiy P. V.

<sup>1</sup> *Novorossiysk Polytechnic Institute (branch) KubSTU, 353900, Russia, Novorossiisk, Karl Marx st. 20*

e-mail: [pvc-60@yandex.ru](mailto:pvc-60@yandex.ru)

The controlled multi-wavelength laser system has been built to study the lidar signal dependence on the particles concentration and their size distribution function for the remote sensed aerosol. The experimental studies of these dependence on the cement aerosol particle size distribution function parameters have been carried out. The measurement procedures algorithms were developed and correlation dependences of the experimentally measured lidar signals on the particles concentration and their size distribution were obtained.

**Keywords:** laser system, laser radiation wavelength, lidar signal, size distribution functions, cement aerosol particles.

## References

1. Dyachenko V. V. Regional problems of technosphere safety of the North Caucasus. Life safety. 2003. No. 2. P. 32–37.
2. Privalov V. E., Fotiadi A. E., Shemanin V. G. Lasers and environmental monitoring of the atmosphere. St. Petersburg: Lan Publishing House. 2012. 288 p.
3. Green H., Lane V. Aerosols – dusts, smokes and fogs. Leningrad: Chemistry Publishing House, Leningrad Region, 1969. 428 p.
4. Vedenin E. I., Chartiy P. V., Shemanin V. G. Laser system for warning of aerosol emissions. Safety in the technosphere. 2014. No. 5(50) September–October. P. 25–31.
5. Donchenko V. A., Kabanov M. V., Kaul B. V., Samokhvalov I. V. Atmospheric Electro-Optics. Tomsk: NTL Publishing House. 2010. 220 p.
6. Vedenin E. I., Chartiy P. V., Shemanin V. G. Laser System for Warning of Emergency Emissions of Industrial Aerosols into the Atmosphere. News of Higher Educational Institutions. Physics. 2013. Vol. 56, No. 8/3. P. 278–280.

7. Vedenin E. I., Polovchenko S. V., Chartiy P. V., Shemanin V. G. Changes in the Particle Size Distribution Function under Different Operating Modes of Dust Collection Equipment. *Safety in the Technosphere*. 2016. No. 1(58). P. 41–47.
8. Zuev V. E., Naats I. E. Inverse problems of atmospheric optics. Leningrad: Gidrometeoizdat. 1990. 287 p.
9. Privalov V. E., Shemanin V. G. Accounting for the laser radiation line width in the lidar equation for Raman scattering. *Optical Journal*. 2015. Vol. 82. No. 9. P. 11–15.
10. Arkhipov V. A. Laser methods for diagnostics of heterogeneous flows. Tomsk: Tomsk University Press. 1987. 140 p.
11. Arkhipov V. A., Akhmadeev I. R., Bondarchuk S. S., Vorozhtsov B. I., Pavlenko A. A., Potapov M. G. Modified method of spectral transparency for measuring aerosol dispersion. *Optics of the atmosphere and ocean*. 2007. Vol. 20, No. 01. Pp. 48–52.
12. Boren K., Huffman D. Absorption and scattering of light by small particles. Moscow: Mir. 1986. 660 p.
13. Prishivalko A. P. Light scattering by spherical particles and polydisperse media. A. P. Prishivalko, E. K. Naumenko: preprint of the Institute of Physics of the Academy of Sciences of the BSSR. Minsk. 1972. Part 1. 61 p.
14. Polovchenko S. V., Privalov V. E., Chartiy P. V., Shemanin V. G. Reconstruction of the particle size distribution function based on multiwave laser probing data. *Optical Journal*. 2016. Vol. 83. No. 5. Pp. 43–49.
15. Polovchenko S. V. Optical characteristics of polydisperse systems in a wide range of input parameters. Certificate of state registration of the database No. 2014621475 dated October 22, 2014.

УДК 535.311, 551.508.77, 621.317.79

ГРНТИ 29.31.29, 37.21.03

ВАК 2.2.6, 2.2.8

### **Обработка данных физического эксперимента с использованием языка программирования Python**

А. М. Вальшин, И.А.Смирнов

*Уфимский университет науки и технологий, 450076, Уфа*

e-mail: amvals@mail.ru

Оперативное получение результатов измерений и их обработка является важнейшей частью физического эксперимента. Для этих целей используется большое количество различных аппаратных и программных средств.

Существуют эффективные программные средства для отображения и анализа информации, полученной в ходе эксперимента. Например, широко используемые для этой цели программные пакеты ORIGIN и MATLAB, а также входящий в состав MicrosoftOfficeEXCEL.

ORIGIN— пакет программ фирмы OriginLabCorporation для численного анализа данных и научной графики. Возможности этого средства более чем достаточны для обработки данных и построения качественных графиков. К недостаткам можно отнести трудность изучения и сложный интерфейс. Те же замечания можно отнести и к MATLAB. Необходимо отметить также высокую стоимость этих программных средств.



**Ключевые слова:** физический эксперимент, программные пакеты, цифровой осциллограф TDS2024, спектрометр Avantes, мощности оптического сигнала, энергия.

Один из наиболее популярных в настоящее время языков программирования Python предоставляет широкие возможности работы с данными, сравнимые с программным пакетом MATLAB. Кроме того, можно учитывать требования каждого конкретного случая отображения и обработки данных эксперимента. К примеру, то, что требует рассмотрения множества опций в различных меню программы ORIGIN, выполняется в несколько кликов созданной нами программы на языке Python. Сам Python и поставляемые к нему библиотеки совершенно бесплатны.

По условиям эксперимента использовались следующие измерительные приборы:

- Цифровой осциллограф TDS2024
- Спектрометр Avantes, модель AvaSpec 3648

Для получения файла данных с цифрового осциллографа TDS2024 в формате .csv использовалась предоставляемая фирмой-производителем Tektronix программа OpenChoiseDesktop.

Для получения файла данных эксперимента спектрометра Avantes использовались штатные средства программы для конвертирования в ASCII формат. Полученный файл имел расширение .trt. Существует возможность получения данных в формате .xls.

Дополнительно использовался цифровой осциллограф GDS806S для отработки режима работы непосредственного управления и съема данных осциллографа через интерфейс RS232.

Для взаимодействия с программой MathCAD реализована возможность импорта массивов, полученных в данной программе.

Предоставлена возможность ввода массивов, состоящих из множества точек.

Все полученные и обработанные графики можно сохранить в формате .jpg.

На рис. 1 показано окно программы после обработки файла типа .csv, полученного от осциллографа TDS2024.

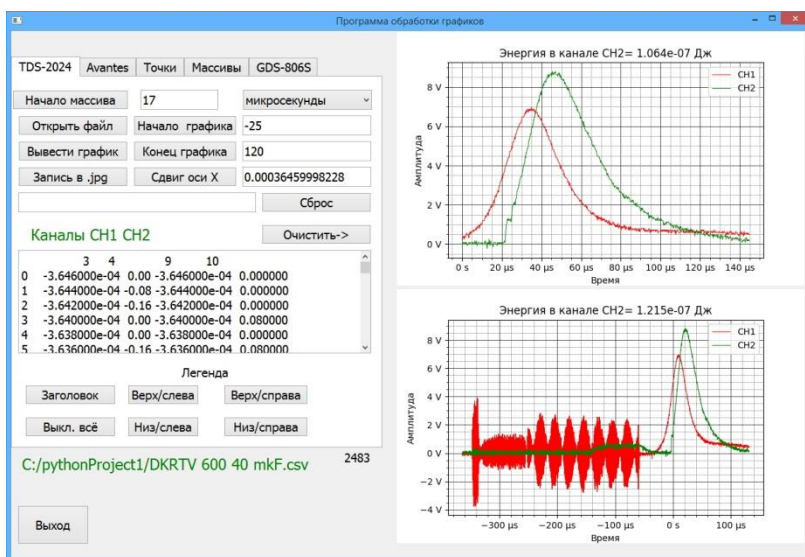


Рис. 1. Окно программы после обработки файла типа .csv, полученного с осциллографа TDS2024. Нижняя осциллограмма справа – исходный файл. На

верхней осциллограмме выделен требуемый участок и скорректировано начало шкалы времени. Массивы данных использованных каналов осциллографа выведены в центре левой части окна программы.

Пример обработки файла данных, полученного со спектрометра Avantes, продемонстрирован на рис. 2.

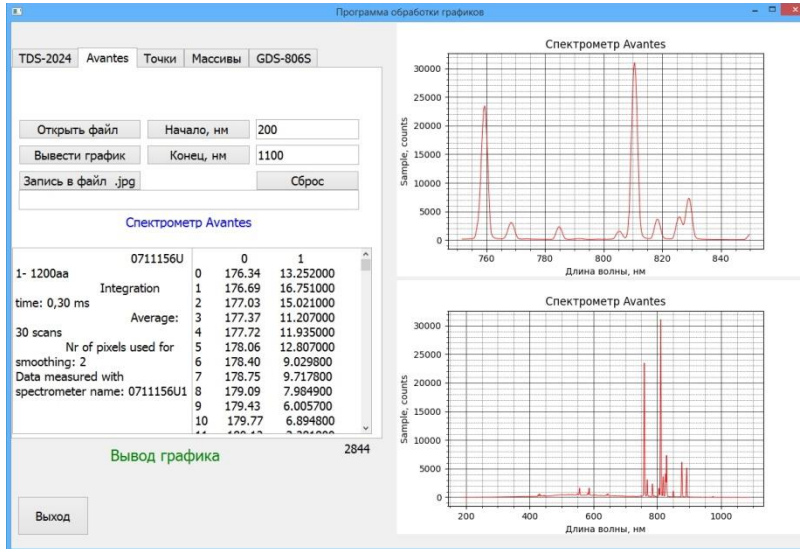


Рис. 2. Окно программы после обработки файла типа .trt, полученного со спектрометра Avantes. Нижняя осциллограмма справа получена от исходного файла. На верхней осциллограмме выделен требуемый участок. В левой части в разных окнах выведен заголовок файла и массив полученных данных.

На рис. 3 демонстрируется возможность измерения мощности сигнала с одного из каналов осциллографа и вычисление его энергии интегрированием в программе Python с использованием библиотеки scipy.

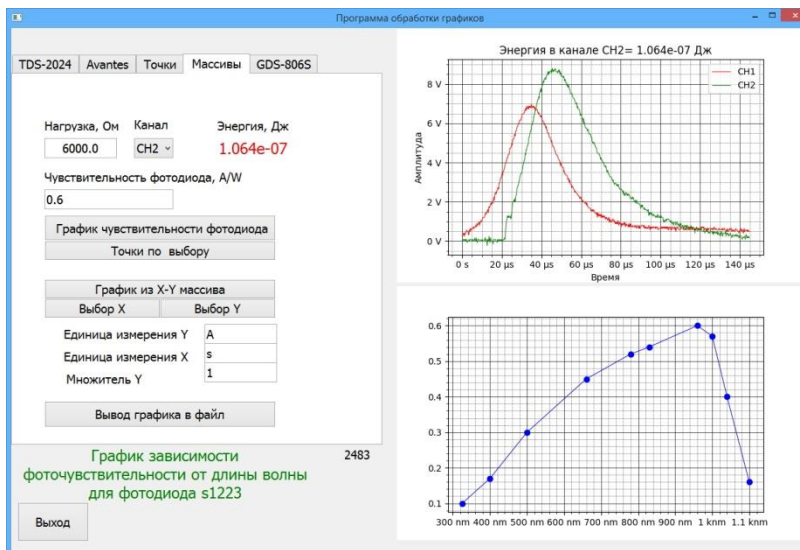


Рис. 3. На нижней осциллограмме справа выведен калибровочный график для фотодиода s1223, используемого для измерения мощности. Энергия рассчитана интегрированием по Симпсону.

На рисунках 4 и 5 показан процесс построения графика по введенным массивам точек

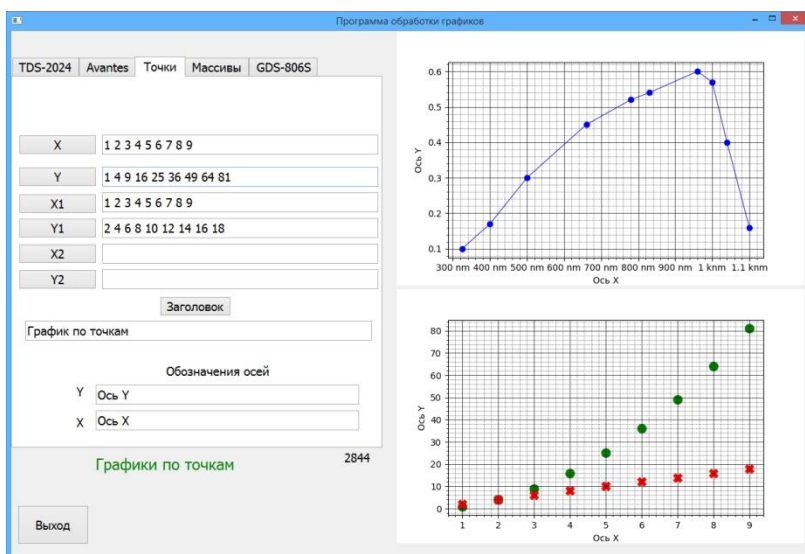


Рис. 4. В левой части показан ввод данных в поля для графика по точкам.

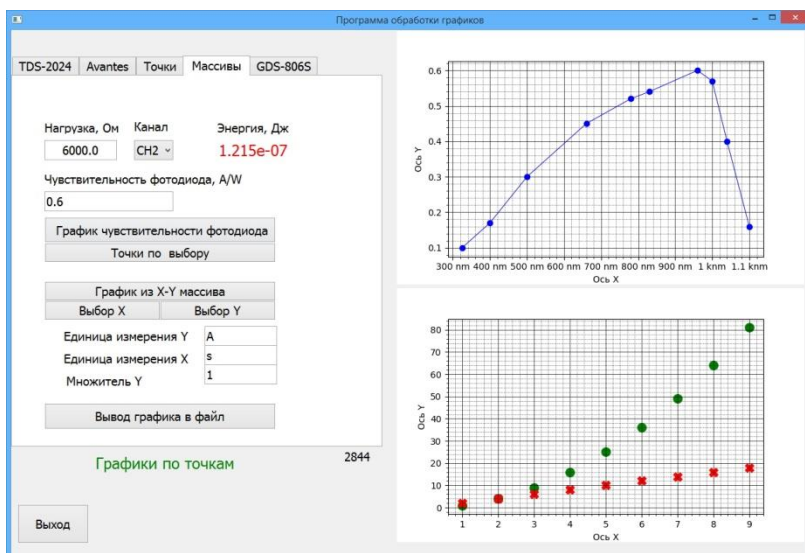


Рис. 5. На нижней осциллограмме справа выведен график по точкам, введенным в предыдущем окне, нажатием на кнопку «Точки по выбору».

На рис. 6 построен график из массивов X и Y, импортированных из программы MathCAD. Форма импульса была рассчитана и промоделирована в указанной программе.

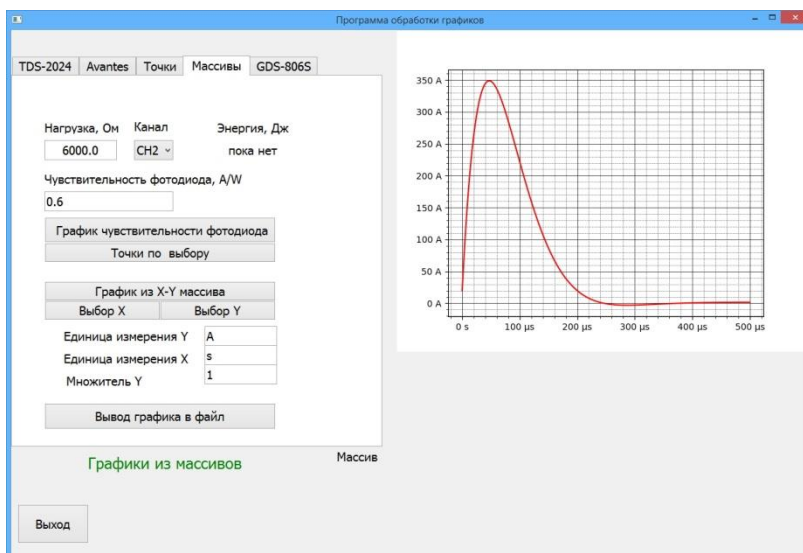


Рис. 6. График формы импульса, параметры которого предварительно рассчитаны в программе MathCAD. Массивы X и Y импортированы из указанной программы.

Дополнительно изучалась возможность управления и съёма массива данных с устаревшей модели осциллографа GDS806S от фирмы GoodWillInstrumentCo. К сожалению, программное обеспечение осциллографа оказалось ограничено совместимым с версией операционной системы выше WindowsXP. В среде Windows 7 и выше удалось запустить обмен лишь по интерфейсу RS232. Результат показан на рис. 7.



Рис. 7. Осциллограмма, полученная с осциллографа GDS806S по каналу RS232. Данные получены «как есть», без дополнительной обработки

Программа написана в версии Python 3.11 с использованием интегрированной среды программирования PyCharm 2023.1.5. Отдельные фрагменты программы обрабатывались в среде JupyterNotebook.

Для создания графического интерфейса программы использовался модуль для разработки GUIPyQt5.

Создание графиков производилось с помощью библиотеки matplotlib. Для обработки массивов данных применялись библиотеки pandas, numpy. Для

математических расчётов использована библиотека `scipy`. Работа с портом RS232 осуществлялась с помощью модуля `serial`.

Запуск программы возможен из среды программирования, или, при установленном интерпретаторе Python из командной строки Windows. Был также создан исполняемый `exe` файл с возможностью запуска программы независимо от наличия установленного интерпретатора языка Python.

### **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. УэсМаккинни. Python и анализ данных: Первичная обработка данных с применением `pandas`, `NumPy` и `Jupyter` / пер. с англ. А. А. Слинкина. 3-е изд. – М.: МК Пресс, 2023. – 536 с.: ил. ISBN 978-5-93700-174-0
2. Кристиан Хилл. Научное программирование на Python /пер. с англ. А. В. Снастина. –М.:ДМК Пресс, 2021. – 646 с.: ил.
3. Гарафутдинов Р. В. Python для анализа данных [Электронный ресурс] : учебное пособие / Р. В. Гарафутдинов ; Пермский государственный национальный исследовательский университет. – Электронные данные. – Пермь, 2024. – 9,19 Мб ; 276 с. – Режим доступа: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/Garafutdinov-Python-dlya-analiza-dannyh.pdf>. – Заглавие с экрана. ISBN 978-5-7944-4096-6
4. Хайбрахманов, С. А. Основы научных расчётов на языке программирования Python : учеб. пособие / С. А. Хайбрахманов. — Челябинск: Изд-во Челяб. гос. ун-та, 2019. — 96 с. ISBN 978-5-7271-1629-6
5. DevpracticeTeam. Python. Визуализация данных. `Matplotlib`. `Seaborn`. `Mayavi`. - `devpractice.ru`. 2020. - 412 с.: ил.
6. Менжевицкий В.С. Графическое отображение данных с использованием пакета `Origin`. Учебно-методическое пособие. – Казань: Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2013. – 56 с.
7. Построение графических моделей в среде `MATLAB` : учеб. - метод. пособие / В.Д. Дубовец, В.А.Столер, В.Ф. Бондаренко. Минск: БГУИР, 2014. – 70 с.
8. Серия TDS2000C и TDS1000C-EDU. Цифровой запоминающий осциллограф. Руководство по эксплуатации.
9. Programmer Manual TDS200, TDS1000/TDS2000, TDS1000B/TDS2000B, and TPS2000 Series Digital Oscilloscopes.
10. Digital Storage Oscilloscope GDS-806/810/820/840. Programming Manual.
11. GDS-800 Series Digital Storage Oscilloscope Operation Manual.

## **Processing of data from a physical experiment using the Python programming language**

A.M. Valshin, I.A.Smirnov

*Ufa University of Science and Technology, 450076, Ufa*

e-mail: [amvals@mail.ru](mailto:amvals@mail.ru)

Prompt receipt of measurement results and their processing is an essential part of a physical experiment. For these purposes, a large number of different hardware and software tools are used. There are effective software tools for displaying and analyzing the information obtained during the experiment. For example, the ORIGIN and MATLAB software packages widely used for this purpose, as well as Microsoft Office EXCEL. ORIGIN is a software package from OriginLab Corporation for numerical data analysis and scientific graphics. The capabilities of this tool are more than sufficient for data processing and building high-quality graphs. The disadvantages include the difficulty of learning and the complex interface. The same remarks can be applied to MATLAB. It should also be noted the high cost of these software tools.

*Keywords:* physical experiment, software packages, digital oscilloscope TDS2024, Avantes spectrometer, optical signal power, energy.

## References

1. Wes McKinney. Python and data analysis: Primary data processing using pandas, NumPy and Jupiter / translated from English by A. A. Slinkin. 3rd ed. – Moscow: MK Press, 2023. – 536 p.: ISBN 978-5-93700-174-0
2. Christian Hill. Scientific programming in Python /translated from English by A.V. Snastina. –M.:DMK Press, 2021. – 646 p.
3. Garafutdinov R. V. Python for data analysis [Electronic resource] : textbook / R. V. Garafutdinov ; Perm State National Research University. – Electronic data. – Perm, 2024. – 9.19 Mb; 276 p. – Access mode: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/Garafutdinov-Python-dlya-analiza-dannyh.pdf>. ISBN 978-5-7944-4096-6
4. Khaybrakhmanov, S. A. Fundamentals of scientific calculations in the Python programming language: textbook. the manual / S. A. Khaybrakhmanov. — Chelyabinsk: Publishing house of the Chelyabinsk State University, 2019. — 96 p. ISBN 978-5-7271-1629-6
5. Devpractice Team. Python. Data visualization. Matplotlib. Seaborn. Mayavi. - devpractice.ru . 2020. - 412 p.
6. Menzhevitsky V.S. Graphical display of data using the Origin package. Educational and methodical manual. – Kazan: Kazan (Volga Region) Federal University, 2013. – 56 p .
7. Building graphical models in the MATLAB environment : studies. - the method. handbook / V.D. Dubovets, V.A.Stoler, V.F. Bondarenko. Minsk: BGUIR, 2014. – 70 p.
8. TDS2000C and TDS1000C-EDU series. Digital storage oscilloscope. User manual.
9. Programmer Manual TDS200, TDS1000/TDS2000,TDS1000B/TDS2000B, and TPS2000 Series Digital Oscilloscopes.
10. Digital Storage Oscilloscope GDS-806/810/820/840. Programming Manual.11. GDS-800 Series Digital Storage Oscilloscope Operation Manual.

## ЛАЗЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 535:621.373.8

ГРНТИ 29.33.15

ВАК 01.04.21

### **Компьютерное моделирование лидарного уравнения для комбинационного рассеяния света молекулами алканов**

Привалов В.Е.<sup>1</sup>, Чербачи Ю.В.<sup>2</sup>, В.Г. Шеманин<sup>2,3</sup>

<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*

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

e-mail: vshemanin@mail.ru

Выполнено компьютерное моделирование лидарного уравнения для комбинационного рассеяния света молекулами алканов для измерения концентраций молекул этих углеводородов в атмосфере. Оценка возможностей лидарных измерений важна для популяционного контроля концентраций алканов - метана, этана, пропана, бутана, пентана и гексана, в атмосфере. Использование в лидарах комбинационного рассеяния света излучения лазеров на длинах волн 532, 405, 650 и 785 нм показало, что наилучший результат дает использование излучения на длинах волн 405 и 532 нм. Получено, что на длине волны 532 нм можно зарегистрировать концентрацию на уровне ПДК для метана во всем рассмотренном диапазоне расстояний до 1500 м, для этана – до 767 м, для пропана – до 941 м, для бутана – до 707 м, для пентана – до 518 м и для гексана – до 185 м.

**Ключевые слова:** лидар комбинационного рассеяния света, молекула, концентрация, алканы, дальность зондирования, длина волны лазерного излучения.

**Введение.** В последние десятилетия наблюдается рост интереса к технологии лидаров, особенно в контексте мониторинга атмосферных загрязнителей, включая алканы или предельные углеводороды. Эти вещества являются не только основными компонентами природного газа, но и представляют собой сильные парниковые газы, оказывающие заметное влияние на климатическую динамику. Таким образом, исследование и мониторинг их концентраций в атмосфере становятся актуальными для оценки и управления воздействием на окружающую среду.

Целью настоящей работы является компьютерное моделирование лидарного уравнения для комбинационного рассеяния света молекулами алканов для выбора оптимального варианта лидара для измерения концентраций молекул этих углеводородов в атмосфере.

**Лидар комбинационного рассеяния света.** Для оценки возможностей измерений в нашем исследовании использовалась модель лидарной системы, основанной на принципах комбинационного рассеяния света. Мы провели анализ спектроскопических данных с использованием известного программного обеспечения для квантовой механики, что позволило получить необходимые параметры рассеяния для алканов.

Оптическая схема такого варианта лидара комбинационного рассеяния света построена по биаксиальной схеме как и в [1, 3, 4] и приведена на рис. 1.

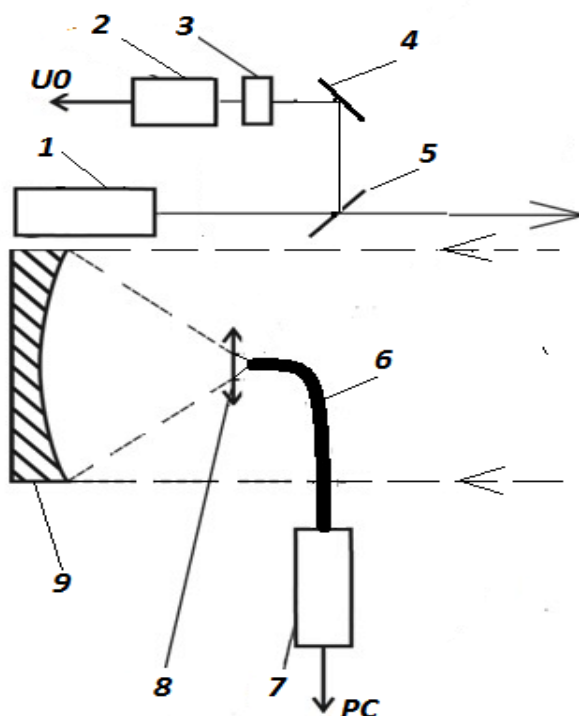


Рис. 1. Оптическая схема лидара комбинационного рассеяния света:  
 1- лазер, 2 – фотоприемник, 3 - интерференционный светофильтр, 4 – глухое зеркало, 5 - стеклянная пластина, 6- волоконный ввод, 7- микро спектрометр, 8 - линзовый объектив. 9-сферическое зеркало приемного телескопа.

В качестве зондирующего излучения используется излучение второй гармоники YAGNd-лазера с накачкой полупроводниковым лазером с длиной волны 532 нм и полупроводниковых лазеров с длинами волн 405, 650 и 785 нм с длительностью импульсов 10 нс и энергиями в импульсе до 10 мкДж при частоте следования лазерных импульсов  $f$  до 10 кГц [6]. Излучение лазера 1 направлялось параллельно оси приемного телескопа на расстоянии 250 мм, как и в [1, 6], а излучение комбинационного рассеяния молекулами алканов в атмосферном пограничном слое в направлении назад собиралось приемным телескопом типа Ньютона со сферическим зеркалом 9 диаметром 400 мм и фокусировалось линзовым объективом 8 в волоконный ввод микро спектрометра 7 типа FSD-8, работающего на линии с ПК. Часть лазерного излучения направлялось стеклянной пластиной 5 и глухим зеркалом 4 через интерференционный светофильтр 3 на фотоприемник 2, напряжение  $U_0$  с которого записывалось платой сбора данных в ПК, для контроля энергии лазерного импульса и формирования начала отсчета времени измерения.

**Лидарное уравнение для комбинационного рассеяния света.** Лазер лидара будем характеризовать числом фотонов  $n_0$  в импульсе посылаемого в атмосферу



лазерного излучения длительностью  $\tau_0$ , а линию генерации лазера будем считать Гауссовой с максимумом на частоте  $\nu_0$  и полушириной  $\Gamma_0$ . Тогда число фотонов  $n(\nu, z)$  излучения комбинационного рассеяния света исследуемыми молекулами алканов с концентрацией  $N(z)$  на фотоприемнике лидара можно получить из лидарного уравнения в направлении назад в режиме счета фотонов в виде [7, 9] как интеграл в интервале от  $(\nu_0 - \Gamma_0)$  до  $(\nu_R - \Gamma_R)$  [5]:

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

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, которое определяется как отношение энергии импульса лазерного излучения длительностью  $\tau_0$  к энергии фотона  $E_0/h\nu_0$  и  $\tau_1$  – время одного измерения или длительности синхроимпульса. Кроме того, обозначены  $S_0$  – площадь приемной апертуры телескопа;  $G(z)$  – геометрическая функция лидара [1, 5, 6]. Эта функция определяется параметрами оптической схемы лидара и количественно характеризует степень виньетирования потока рассеянного назад излучения, поступающего на фотоприемник из рассеивающего объема атмосферы с расстояния  $z$  [6] и лежит в пределах  $0 < G(z) < 1$ . Следующие величины  $N(z)$  – концентрация исследуемых молекул;  $t_d$  – время измерения или накопления сигнала и  $(d\sigma/d\Omega)$  – дифференциальное сечение комбинационного рассеяния света исследуемыми молекулами: два сомножителя – пропускание атмосферы – равны соответственно [1]:

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

где  $\alpha(\nu_0, r)$  и  $\alpha(\nu_R, r)$  – коэффициенты ослабления на частотах лазерного излучения и комбинационного рассеяния света молекулами алканов. Учитывая эти выражения, перепишем уравнение (1) в виде:

$$n(\nu, z) = \frac{c \tau_0}{2z^2} n_0 S_0 G(z) N(z) f t_d (d\sigma / d\Omega) \int_{\nu_0 - \Gamma}^{\nu_R + \Gamma_a} \Phi(\nu') \exp\left[-\int_0^z \{\alpha(\nu_0, r) + \alpha(\nu_R, r)\} dr\right] A(\nu') d\nu' \quad (2)$$

где  $\Phi(\nu)$  – функция распределения фотонов лазерного излучения в линии генерации [5] и для Гауссовой формы этой линии может быть представлена в виде

$$\Phi(\nu) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\Gamma_0} \exp\left\{-\frac{(\nu - \nu_0)^2}{2\Gamma_0^2}\right\} \quad (3)$$

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

$$A(\nu) = \frac{HW}{\pi[(\omega - \omega_0)^2 + HW^2]} \quad (4)$$

где  $K_L$  – лидарная константа на частоте  $\nu_0$  лазерного излучения, измеренная экспериментально в [7];  $\xi(\nu_R)$  – относительная спектральная чувствительность фотоприемника на частоте  $\nu_R$  излучения комбинационного рассеяния света. Тогда перепишем уравнение (2) в виде

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

в этом выражении обозначена константа  $B$  как

$$B = \frac{c\tau_1}{2} S_0 f \quad (6)$$

и некоторая функция  $I(\nu, z)$ , имеющая вид

$$I(\nu, z) = G(z) n_0 \int_{\nu_0 - \Gamma}^{\nu_R + \Gamma_a} (d\sigma / d\Omega) \exp\left[-\int_0^z \{\alpha(\nu_0, r) + \alpha(\nu_R, r)\} dr\right] A(\nu') d\nu' \quad (7)$$

при условии, что  $\Phi(\nu) = 1$ , когда полуширина линии генерации много меньше, чем полуширина аппаратной функции лидара. Предположение о том, что полуширина аппаратной функции на порядок больше, чем полуширина линии генерации лазера, вполне допустимо для промышленных лазеров и спектрометров [1]. В предположении, 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 алканов, вынесем их из-под интеграла и получим

$$I(\nu, z) = G(z) n_0 (d\sigma / d\Omega) \exp\left[-\int_0^z \{\alpha(\nu_0, r) + \alpha(\nu_R, r)\} dr\right] \int_{\nu_0 - \Gamma}^{\nu_R + \Gamma_a} A(\nu') d\nu' \quad (8)$$

Последний интеграл может быть преобразован в интеграл ошибок [7] как

$$\begin{aligned} \int_{\nu_0 - \Gamma}^{\nu_R + \Gamma_a} A(\nu') d\nu' &= \frac{K_1 \xi(\nu)}{\sqrt{2\pi} \Gamma_a} \int_{\nu_0 - \Gamma}^{\nu_R + \Gamma_a} \exp[-(\nu - \nu_R)^2 / (2\Gamma_a^2)] d\nu = \\ &= \operatorname{erf}(1/\sqrt{2}) K_1 \xi(\nu) = \frac{K_1 \xi(\nu)}{2} 0.68269 = 0.34 K_1 \xi(\nu) \end{aligned} \quad (9)$$

Тогда выражение (8) с учетом (9) перепишем в виде

$$I(\nu, z) = G(z) n_0 (d\sigma / d\Omega) \cdot 0.34 K_1 \xi(\nu) \exp\left[-\int_0^z \{\alpha(\nu_0, r) + \alpha(\nu_R, r)\} dr\right] \quad (10)$$

Теперь из уравнения (5) выразим концентрацию  $N(z)$  в виде

$$N(z) = \frac{n(\nu, z)z^2}{BtI(\nu, z)} \quad (11)$$

с учетом (6) и (10).

Будем рассматривать однократное комбинационное рассеяние света и однородную атмосферу [1, 6, 8]. Значения максимумов полос валентных СН колебаний молекул предельных углеводородов взяты из [1, 6, 7, 9- 11], а для полос валентных колебаний СН молекул метана из двух 2914 см<sup>-1</sup> (симметричного) и 3017 см<sup>-1</sup> (антисимметричного) взято значение для симметричного СН колебания, которое имеет большее значение дифференциального сечения колебательного комбинационного рассеяния света – 32.2 10<sup>-30</sup> см<sup>2</sup> по сравнению с 14.0 10<sup>-30</sup> см<sup>2</sup> для антисимметричного валентного колебания. Значения дифференциальных сечений комбинационного рассеяния света для остальных молекул ( $d\sigma/d\Omega$ ) и для выбранных длин волн лазерного излучения 405, 532, 650 и 785 нм были определены по данным [9, 11] для длины волны излучения азотного лазера 337 нм и рассчитанные с учетом зависимости  $1/\lambda^4$  для интересующих нас длин волн значения приведены в таблице 1.

Таблица 1. Длины волн и частоты лазерного излучения и полос комбинационного рассеяния света молекул алканов, дифференциальные сечения колебательного комбинационного рассеяния света для этих полос, коэффициенты ослабления в атмосфере на этих длинах волн и относительная спектральная чувствительность фотоприемника

Длина волны, $\lambda$ , nm	Частота, $\nu$ , GHz	Дифференциальное сечение КРС ( $d\sigma/d\Omega$ ) 10 <sup>30</sup> см <sup>2</sup>	Коэффициент ослабления $\alpha(\nu_0, r)$ , km <sup>-1</sup>	Коэффициент ослабления $\alpha(\nu_R, r)$ , km <sup>-1</sup>	Относительная спектральная чувствительность фотоприемника $\xi(\nu)$
Метан – CH <sub>4</sub>		$\nu = 2914 \text{ см}^{-1}$ (сим)		7000 мг/м <sup>3</sup> или 2,6 10 <sup>17</sup> см <sup>-3</sup>	
785	382.2	1.09	0.06		
1017.8	294.8			0.04	0.06
650	461.5	2.33	0.14		
801.9	374.1			0.07	0.49
532	563.9	5.18	0.16		
629.6	477.0			0.09	0.95
405	740.7	15.44	0.24		
459.2	653.3			0.19	0.84
337	890.2	32.2			
373.8	802.6				
Этан – C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>		$\nu = 2954 \text{ см}^{-1}$		50 мг/м <sup>3</sup> или 5.0 10 <sup>15</sup> см <sup>-3</sup>	
785	382.2	1.60	0.06		
1022.0	294.0			0.03	0.05
650	461.5	3.40	0.14		
804.5	372.9			0.06	0.48
532	563.9	7.57	0.16		
631.2	474.7			0.08	0.98
405	740.7	22.53	0.24		
460.0	652.2			0.19	0.85

337	890.2	47.0			
374.4	801.3				
Пропан – C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>		v = 2886 cm <sup>-1</sup>		300 мг/м <sup>3</sup> или 4,3 10 <sup>15</sup> см <sup>-3</sup>	
785	382.2	2.78	0.06		
1021.9	293.5			0.03	0.05
9					
650	461.5	5.91	0.14		
804.47	572.9			0.06	0.48
532	563.9	13.17	0.16		
631.19	475.3			0.08	0.98
405	740.7	39.22	0.24		
460.04	652.1			0.19	0.85
337	890.2	81.8			
374.26	801.6				
Бутан – C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>		v = 2890 cm <sup>-1</sup>		200 мг/м <sup>3</sup> или 2,1 10 <sup>15</sup> см <sup>-3</sup>	
785	382.2	3,18	0.06		
1015.3	295.5			0.04	0.06
5					
650	461.5	6.76	0.14		
800.34	374.8			0.07	0.49
532	563.9	15.06	0.16		
626.65	478.8			0.09	0.95
405	740.7	44.82	0.24		
458.69	654.0			0.19	0.84
337	890.2	93.5			
373.36	803.5				
Пентан – C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>		v = 2885 cm <sup>-1</sup>		100 мг/м <sup>3</sup> или 8,4 10 <sup>14</sup> см <sup>-3</sup>	
785	382.17	4.21	0.06		
1014.8	295.6			0.04	0.06
3					
650	461.54	8.96	0.14		
800.02	375.0477.4			0.07	0.49
532	563.91	19.97	0.16		
628.46	477.4			0.09	0.95
405	740.74	59.45	0.24		
458.58	654.2			0.19	0.84
337	890.2	124.0			
373.29	803.7				
Гексан – C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>		v = 2886 cm <sup>-1</sup>		60 мг/м <sup>3</sup> или 4,2 10 <sup>14</sup> см <sup>-3</sup>	
785	382,17	4.55	0.06		
1014.9	285.6			0.04	0.06
3					
650	461,54	9.68	0.14		
800.09	375.0			0.07	0.49
532	563.91	21.58	0.16		
628.50	477.3			0.09	0.95
405	740.74	64.24	0.24		
458.60	654.2			0.19	0.84
337	890.2	134.0			
373.31	803.6				

Решение уравнения (11) для этого случая и для метана представлены на Рис. 2.

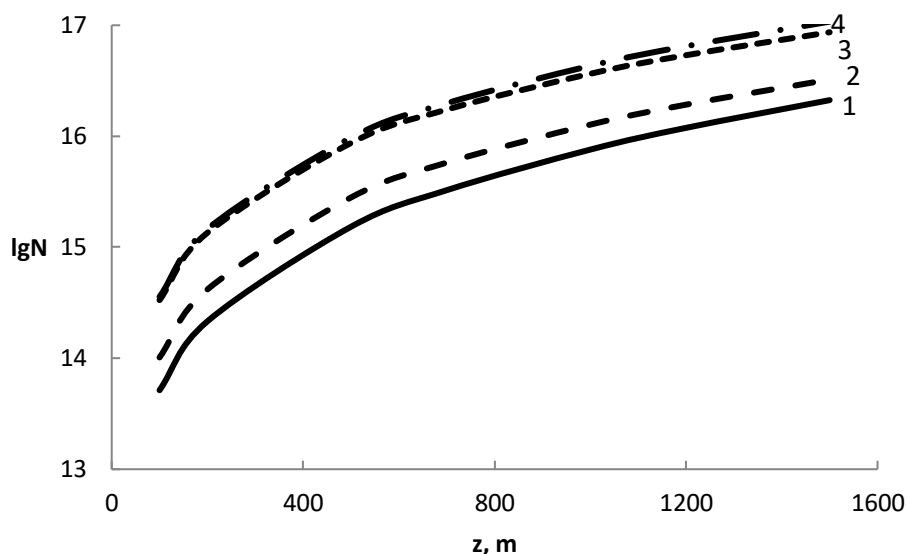


Рис. 2. Графики рассчитанной по уравнению (11) зависимости концентрации молекул метана  $N(z)$  (в логарифмическом масштабе, в  $\text{см}^{-3}$ ) от расстояния  $z$  (в м) для длин волн лазерного излучения 405 (1), 532 (2), 650 (3) и 785 (4) нм при зондировании в атмосфере лидаром комбинационного рассеяния света.

На графиках рис. 2 видно увеличение концентрации исследуемых молекул метана в ряду длин волн лазерного излучения 405 - 532 - 650 - 785 нм за счет спектральной зависимости величин, входящих в уравнение (11), при этом величина концентрации резко нарастает за первые 500 м примерно на порядок. Минимальное значение концентрации молекул метана  $5,15 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  можно получить на длине волны 405 нм для 100 м, для расстояния зондирования 500 м это значение -  $1,53 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , для 1000 м -  $7,58 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , а для 1500 м -  $2,12 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  при частоте следования лазерных импульсов 100 кГц и времени одного измерения 50 нс или шага по высоте  $\Delta H = 7,5$  м. В целом, все эти значения концентрации метана меньше, чем его ПДК =  $2,6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ .

Иная картина получается для бутана. Результаты решения уравнения (11) для этого случая представлены на Рис. 3.

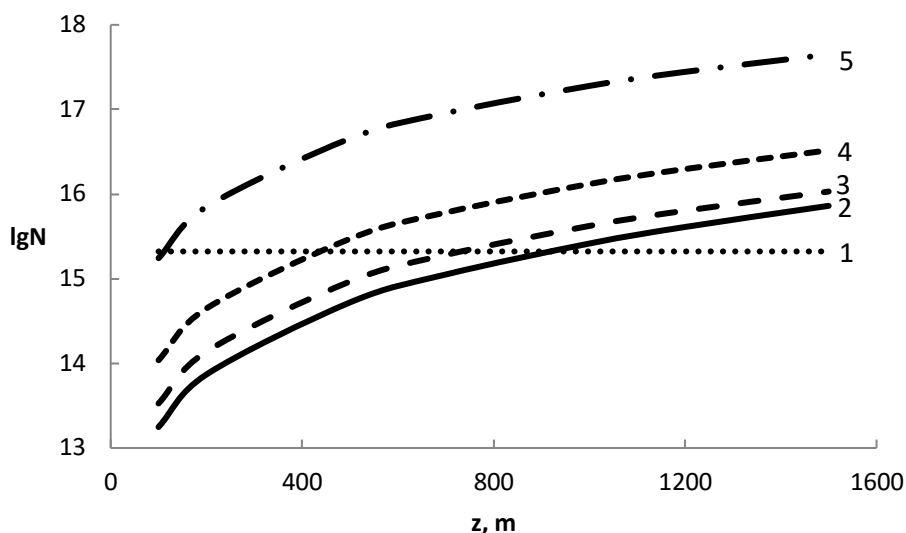


Рис. 3. Графики рассчитанной по уравнению (11) зависимости концентрации молекул бутана  $N(z)$  (в логарифмическом масштабе, в  $\text{см}^{-3}$ ) от расстояния  $z$  (в м) для длин волн лазерного излучения 405 (2), 532 (3), 650 (4) и 785 (5) нм при зондировании в атмосфере лидаром комбинационного рассеяния света. Для сравнения в качестве уровня ПДК приведена прямая (1).

На графиках (рис. 3) в качестве уровня ПДК приведена прямая (1), которая позволяет определить какую концентрацию исследуемых молекул бутана можно зарегистрировать на длинах волн лазерного излучения: на длине волны 405 нм практически до 900 м, на длине волны 532 нм – до 710 м, на 650 нм – 400 м, а 785 нм – до 105 м. Очевидно, что дальнейшее уменьшение величины концентрации исследуемых молекул возможно за счет увеличения времени измерения  $t_d$  и частоты следования лазерных импульсов  $f$  или увеличения их энергии  $E_0$ .

Похожая картина складывается и для гексана. Результаты решения уравнения (11) в этом случае представлены на Рис. 4.

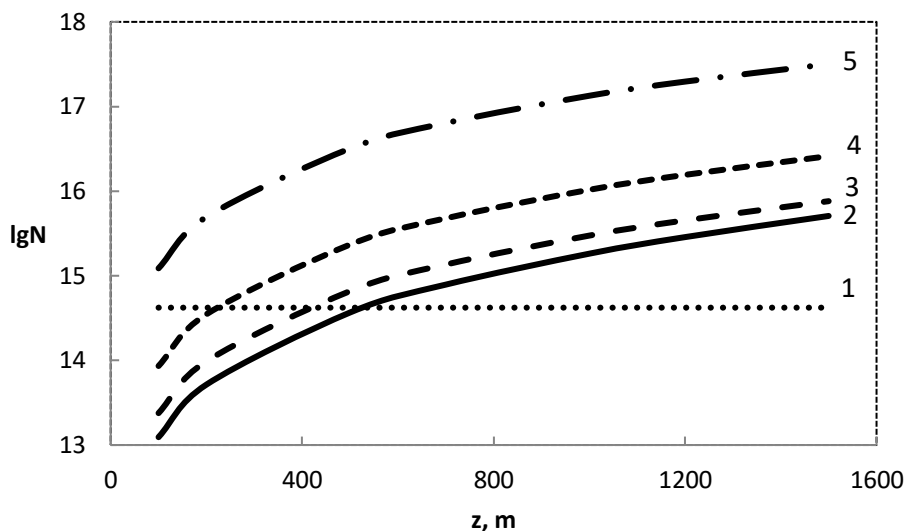


Рис. 4. Графики рассчитанной по уравнению (11) зависимости концентрации молекул гексана  $N(z)$  (в логарифмическом масштабе, в  $\text{см}^{-3}$ ) от расстояния  $z$  (в м) для длин волн лазерного излучения 405 (2), 532 (3), 650 (4) и 785 (5) нм при зондировании в атмосфере лидаром комбинационного рассеяния света. Для сравнения в качестве уровня ПДК приведена прямая (1).

На графиках Рис. 4 сравнение с уровнем ПДК =  $4,2 \cdot 10^{14} \text{см}^{-3}$  позволяет определить диапазон расстояний зондирования, на которых такую концентрацию исследуемых молекул гексана можно зарегистрировать на длинах волн лазерного излучения: на длине волны 405 нм - практически до 480 м, на 532 нм – до 375 м, на 650 нм – до 200 м, а на 785 нм – всего до 25 м.

Аналогичные результаты получаются для остальных молекул – этана, пропана и пентана. На Рис. 5 собраны результаты решения уравнения (11) для зондирования всех молекул лазерным излучением с длиной волны 532 нм.

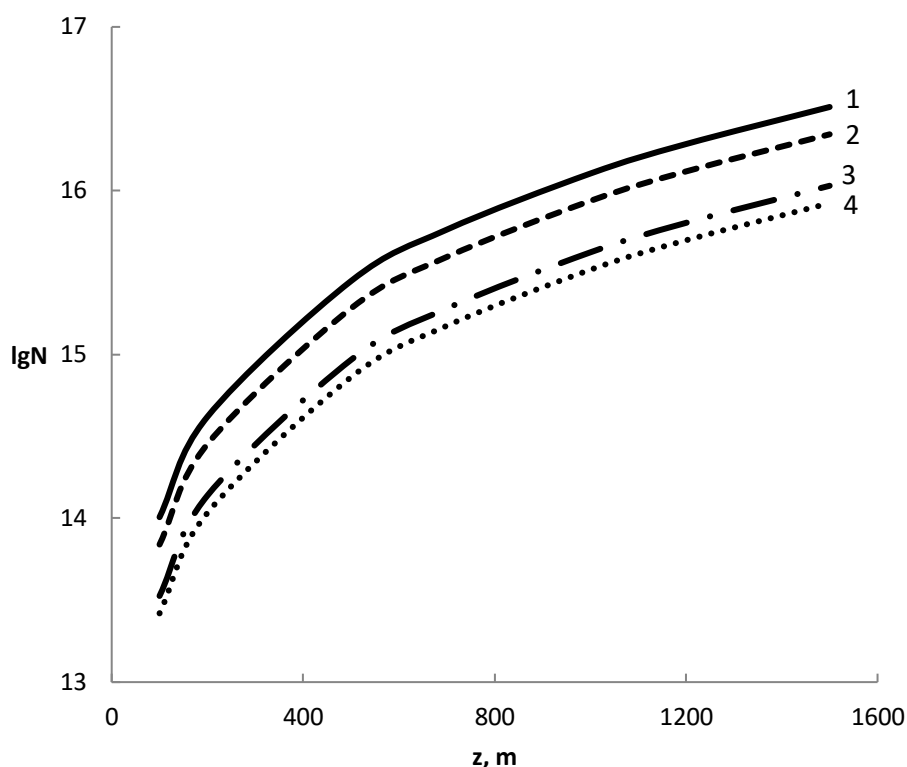


Рис. 5. Графики рассчитанной по уравнению (11) зависимости концентрации молекул  $N(z)$  (в логарифмическом масштабе, в  $\text{см}^{-3}$ ) от расстояния  $z$  (в м) для длины волны лазерного излучения 532 нм при зондировании в атмосфере лидаром комбинационного рассеяния света всех исследованных молекул: метана (1), этана (2), бутана (3) и пентана (4).

Надо отметить, что линия (4) соответствует пентану, гексану и пропану, так как рассчитанные для них значения оказались очень близки. Графики на Рис. 5 показывают, 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 метана во всем рассмотренном диапазоне расстояний до 1500 м, для этана – до 767 м, для пропана – до 941 м, для бутана – до 707 м, для пентана – до 518 м и для гексана - до 185 м. Как уже отмечалось выше, все расчеты сделаны для времени измерения 10 с. Поэтому подбирая время измерения есть возможность увеличить расстояние зондирования для того же варианта лидара комбинационного рассеяния света.

**Заключение.** Таким образом, показано, что результаты компьютерного моделирования для лидара комбинационного рассеяния света в мониторинге

концентраций алканов в атмосфере позволяют найти оптимальные параметры лидара для получения высокой чувствительности и точности измерений. Это важно для экологического мониторинга и управления качеством атмосферного воздуха. Полученные данные формируют основу для дальнейших экспериментальных и полевых исследований, направленных на верификацию теоретических моделей и улучшение методологии измерений.

### Список литературы

1. Привалов В. Е., Фотиади А. Э., Шеманин В. Г. Лазеры и экологический мониторинг атмосферы. С-Пб.: Изд. Лань, 2013.
- 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.
3. Voronina. E. I., Privalov V. E., Shemanin V. G. Alkane hydrocarbons molecules in the near-Earth atmospheric layer photon counting Raman backscattering lidar sensing from Space orbit. //Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). 2010. V.19. No.1. P. 69-.
- 4 Привалов В. Е., Шеманин В.Г. Измерение концентрации молекул углеводородов лидаром комбинационного рассеяния света. //Измерительная техника. 2016. № 9. С. 22-25
- 5 Привалов В. Е., Шеманин В.Г. Лидарное уравнение с учетом конечной ширины линии генерации лазера. // Известия РАН. Серия физическая. 2015, Т.79. Вып, 2, С. 170–180
- 6Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир. 1987.
- 7 Привалов В.Е., Шеманин В.Г. Параметры лидаров для дистанционного зондирования газовых молекул и аэрозоля в атмосфере. С-Пб.: Балт. ГТУ. 2001. 56 с.
8. Донченко, В.А., Кабанов, М.В., Кауль, Б.В., Самохвалов, И.В., Атмосферная электрооптика, Томск: Изд. НТЛ, 2010, С.178-181.
- 9 Лазерный контроль атмосферы. /Под. ред. Хинкли Э.Д..М.: Мир. 1979.
10. Свердлов, Л. М., Ковнер, М. А., Крайнов, Е.П. Колебательные спектры многоатомных молекул, М.: Наука, 1970, 560 с.
- 11 Inaba H., Kobayashi T. Laser-Raman Radar.// Opto-Electronics. 1972. V.4. No.2 P.101-123
12. WMO (World Meteorological Organization). (2022). Atmospheric Greenhouse Gases Bulletin.
13. Huang, H., et al. (2021). New advancements in sighting systems technology for environmental applications. Environmental Monitoring and Assessment, 193(7), 1-16.

### **Computer Simulation of the Lidar Equation for Raman Scattering of Light by Alkane Molecules**

Privalov V.E., Cherbachi Yu.V., V.G. Shemanin.

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia  
Branch of the V.G. Shukhov Belgorod State Technological University in Novorossiysk  
Novorossiysk Polytechnic Institute (branch) of the Kuban State Technological  
University,  
Novorossiysk, Russia.*



Computer simulation of the lidar equation for Raman scattering of light by alkane molecules was performed to measure the concentrations of these hydrocarbon molecules in the atmosphere. Evaluation of the capabilities of lidar measurements is important for population monitoring of alkanes - methane, ethane, propane, butane, pentane and hexane - in the atmosphere. The use of laser radiation at wavelengths of 532, 405, 650 and 785 nm in Raman lidars showed that the best result is obtained using radiation at wavelengths of 405 and 532 nm. It was found that at a wavelength of 532 nm it is possible to register the concentration at the MAC level for methane in the entire considered range of distances up to 1500 m, for ethane - up to 767 m, for propane - up to 941 m, for butane - up to 707 m, for pentane - up to 518 m and for hexane - up to 185 m.

**Keywords:** Raman lidar, molecule, concentration, alkanes, sensing range, laser radiation wavelength.

## References

1. Privalov V. E., Fotiadi A. E., Shemanin V. G. Lasers and environmental monitoring of the atmosphere. St. Petersburg: Lan Publishing House, 2013.
2. Hygienic standards GN 2.1.6.3492-17 (as amended on May 31, 2018). Maximum permissible concentrations (MPC) of pollutants in the atmospheric air of urban and rural settlements.
3. Voronina. E. I., Privalov V. E., Shemanin V. G. Alkane hydrocarbons molecules in the near-Earth atmospheric layer photon counting Raman backscattering lidar sensing from Space orbit. //Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). 2010. V.19. No.1. P. 69-.
- 4 Privalov V. E., Shemanin V. G. Measuring the concentration of hydrocarbon molecules with a Raman lidar. // Measuring equipment. 2016. No. 9. Pp. 22-25
- 5 Privalov V. E., Shemanin V. G. Lidar equation taking into account the finite width of the laser generation line. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physical Series. 2015, Vol. 79. Issue, 2, Pp. 170-180
- 6 Mezheris R. Laser remote sensing. Moscow: Mir. 1987.
- 7 Privalov V. E., Shemanin V. G. Parameters of lidars for remote sensing of gas molecules and aerosol in the atmosphere. St. Petersburg: Balt. GTU. 2001. 56 p.
8. Donchenko, V.A., Kabanov, M.V., Kaul, B.V., Samokhvalov, I.V., Atmospheric Electro-Optics, Tomsk: NTL Publ., 2010, Pp. 178-181.
- 9 Laser Monitoring of the Atmosphere. / Ed. Hinkley E.D.. Moscow: Mir. 1979.
10. Sverdlov, L.M., Kovner, M.A., Krainov, E.P. Vibrational Spectra of Polyatomic Molecules, Moscow: Nauka, 1970, 560 p.
- 11 Inaba H., Kobayashi T. Laser-Raman Radar.// Opto-Electronics. 1972. V.4. No.2 P.101-123
12. WMO (World Meteorological Organization). (2022). Atmospheric Greenhouse Gases Bulletin.
13. Huang, H., et al. (2021). New advancements in sighting systems technology for environmental applications. Environmental Monitoring and Assessment, 193(7), 1-16.

## ЛАЗЕРНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

УДК 551.0  
ГРНТИ 87.15.03  
ВАК 01.03.21

### Лазерное зондирование аэрозольного загрязнения атмосферного воздуха над мусорным полигоном в г. Новороссийске

Дьяченко В.В., Куля Д.Н.

*Новороссийский политехнический институт (филиал) Кубанского государственного технологического университета, Новороссийск, Россия*

\*email: v-v-d@mail.ru, [Dashshok2020@gmail.com](mailto:Dashshok2020@gmail.com)

Проанализированы результаты мониторинга аэрозольного загрязнения атмосферы города Новороссийска методами лазерного зондирования. Мониторинг заключается в установке оптических лазерных датчиков аэрозольного загрязнения качества воздуха, которые ведут непрерывный контроль содержания частиц PM<sub>2,5</sub> и PM<sub>10</sub> в атмосферном воздухе. Специфика размещения этих датчиков заключается в том, что они расположены недалеко от Новороссийского городского мусорного полигона. В рассмотренный промежуток времени важнейшим фактором формирования аэрозольного загрязнения стали пожары на полигоне. Исследование факторов превышения предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ свидетельствует о резком увеличении концентрации аэрозолей в воздухе вследствие пожара, что может негативно влиять на здоровье людей.

*Ключевые слова: датчики, аэрозоли, микропластик, предельно допустимые концентрации*

Новороссийск – один из самых экологически неблагополучных городов юга России с точки зрения аэрозольного загрязнения. Аэрозоли – это мелкодисперсные частицы размером менее 10 мкм, находящиеся в атмосферном воздухе. Оседая на почве и в воде, они меняют их химический состав, влияют на уровень кислотности атмосферных осадков, увеличивают в почве содержание тяжелых металлов, концентрирующихся на тонкодисперсных частицах [1], вызывают заболевания дыхательных путей у человека и животных.

Повышенным выделением аэрозолей характеризуются многие виды техногенной деятельности. Основными источниками аэрозолей в нашем городе являются цементные заводы и транспорт, производящие до 25% годового объема аэрозолей всего Краснодарского края [2]. Повышение объемов перевалки грузов через наш порт, таких как уголь, минеральные удобрения, зерно и других, способно значительно усилить аэрозольное загрязнение атмосферы города, так как во время

перевалки сыпучих грузов образуется значительное количество взвешенных частиц. Также к аэрозолям относятся сажа и дым, возникающие при сжигании автомобильного или корабельного топлива и при пожарах. В качестве примера рассмотрим, какое влияние оказывает возгорание ТООП (твердых отходов потребления и производства) на формирование аэрозольного загрязнения воздуха. Обратим внимание на результаты анализа данных, полученных с датчика, измеряющего количество взвешенных частиц в атмосфере. Датчик расположен в с. Борисовка, рядом с которым находится городской мусорный полигон. На полигоне часто происходят пожары, сильнейшие из которых были зафиксированы с 9 по 23 июня и с 23 по 26 августа текущего года [3].

В период с 9 по 23 июня 2024 г. максимальные значения содержаний частиц PM10 (частицы диаметром до 10 мкм) составили 2000 мкг/м<sup>3</sup>, 1954 мкг/м<sup>3</sup>, 1937 мкг/м<sup>3</sup>, 1887 мкг/м<sup>3</sup> (рис. 1), что превышает предельно допустимую концентрацию (ПДК) в 40 раз. Максимальные значения содержаний частиц PM2,5 (частицы диаметром до 2,5 мкм) составили 316 мкг/м<sup>3</sup>, 285 мкг/м<sup>3</sup>, 275 мкг/м<sup>3</sup>, 252 мкг/м<sup>3</sup> (рис. 2), что превышает ПДК в 9 раз. 15 и 16 числа прошел небольшой дождь, поэтому влажность воздуха повысилась с 50 до 74% и концентрация взвешенных частиц в атмосфере снизилась с 2000 мкг/м<sup>3</sup> до 176 мкг/м<sup>3</sup> (для PM10) и с 316 мкг/м<sup>3</sup> до 17 мкг/м<sup>3</sup> (для PM2,5), то есть в 11 и в 18 раз соответственно.

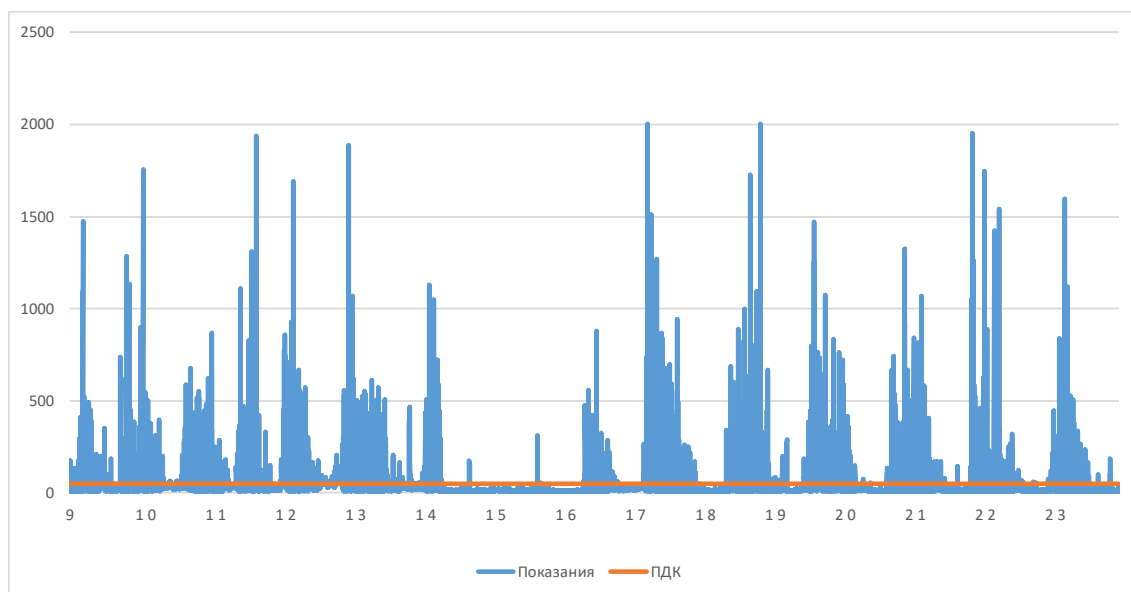


Рис. 1. График колебания содержаний частиц PM10 в атмосферном воздухе в июне 2024 г.

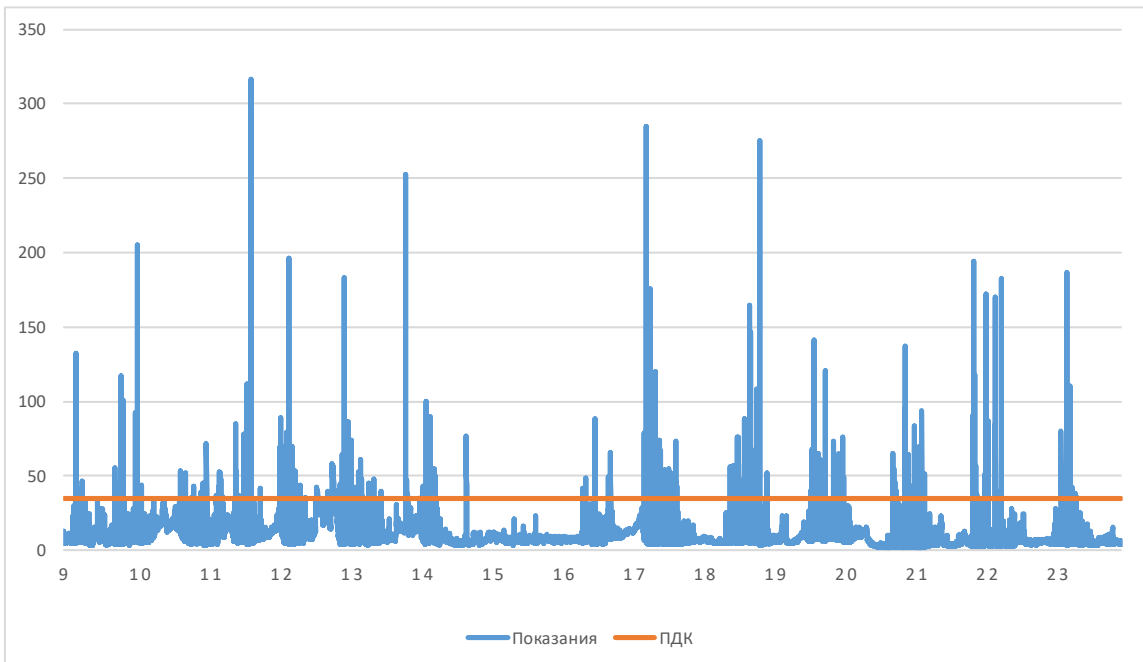


Рис. 2. График колебания содержаний частиц PM2,5 в атмосферном воздухе в июне 2024 г.

Также рассмотрим результаты мониторинга воздуха во время другого пожара - с 23 по 26 августа 2024 г. на этом же пункте мониторинга. Весь месяц стояла сухая жаркая погода, влажность воздуха была менее 50%. Максимальные значения содержаний частиц PM10 в данный промежуток времени составили 588,33 мкг/м<sup>3</sup>, 389,02 мкг/м<sup>3</sup>, 366 мкг/м<sup>3</sup>, 325,05 мкг/м<sup>3</sup> (рис. 3); частиц PM2,5 – 124,75 мкг/м<sup>3</sup>, 112,32 мкг/м<sup>3</sup>, 111,2 мкг/м<sup>3</sup> (рис. 4), что превышает ПДК примерно в 12 и в 4 раза соответственно.

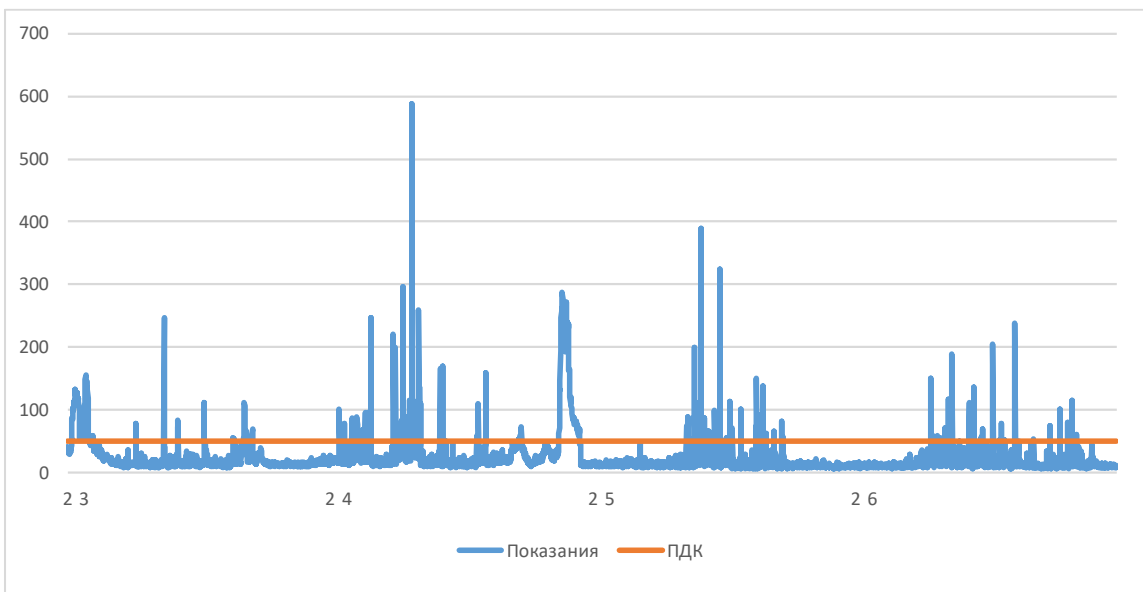


Рис. 3. График колебания содержаний частиц PM10 в атмосферном воздухе в августе 2024 г.

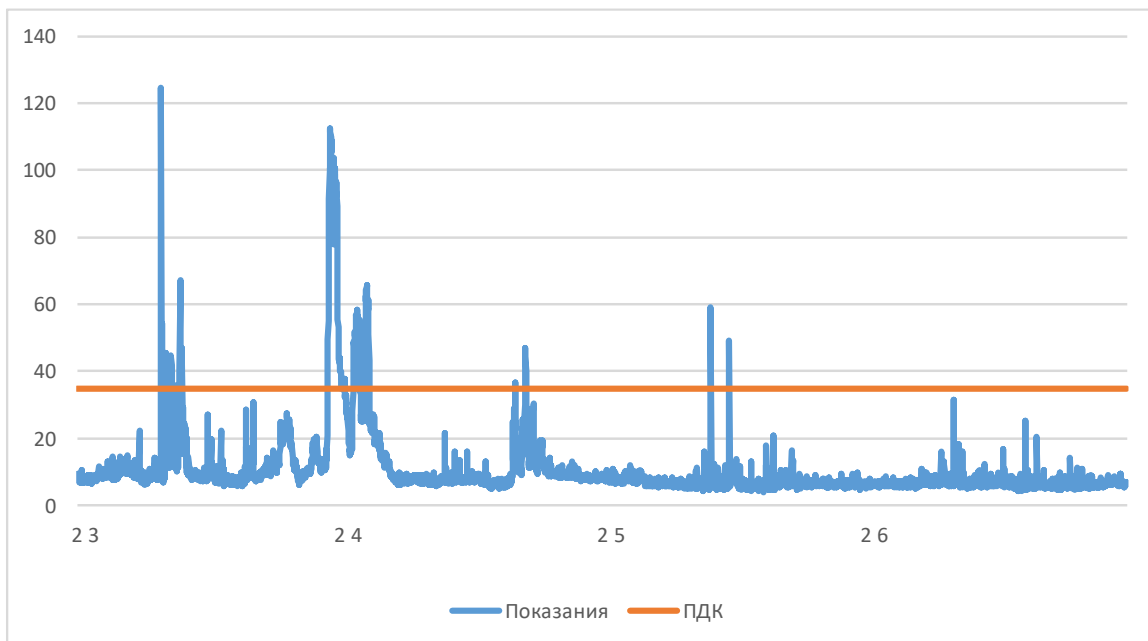


Рис. 4. График колебания содержаний частиц PM<sub>2,5</sub> в атмосферном воздухе в августе 2024 г.

Столь высокие и резкие всплески концентраций частиц обусловлены пожаром на полигоне и объясняются массопереносом продуктов горения вместе с северо-восточным ветром. Вредные вещества, попав в атмосферу близлежащего населенного пункта, формируют неблагоприятную экологическую обстановку и создают угрозу здоровью людей. Также недалеко от датчика проходит пыльная грунтовая дорога, по которой каждый день проезжает множество мусоровозов, а в дни пожара вместо мусоровозов проезжала спецтехника для тушения возгорания. Транспорт поднимает пыль, и она оказывается в воздухе, также создавая загрязнение и угрозу здоровью населения, поскольку городская пыль обладает высокой токсичностью [4,5].

Особую опасность для окружающей среды представляет собой пластик, находящийся на свалке. Под воздействием солнечных лучей и огня при пожарах он начинает распадаться на маленькие гранулы размером с пыль и превращается в микропластик, который посредством аэриального переноса попадает в атмосферу, почву, воду [6]. Каждый год образуется около 300 млн тонн пластиковых отходов, из которых всего 62 млн тонн (21%) перерабатывается. Пластик разлагается сотни лет, нанося огромный вред экосистемам, изменяя или уничтожая их, поэтому захоронение или складирование пластика только усугубит экологическую ситуацию во всем мире.

Расширение Новороссийского транспортного хаба[7] приведет к увеличению численности населения, повышению транспортной загруженности района, интенсификации деятельности многих предприятий и как следствие к обострению проблем со свалкой и загрязнением воздуха аэрозолями. Решить эту проблему, в том числе и ликвидировать возгорания на полигоне, сможет строительство мусороперерабатывающего завода. Схема работы завода довольно проста: мусор отправляют на конвейерные ленты, где рабочие вручную разделяют его на перерабатываемый и неперерабатываемый. К первому относятся стекло, металл, макулатура и пластик – около 70 % выбрасываемого мусора. Ко второму – опасные, композитные отходы и органика. Перерабатываемые отходы сортируют

на фракции, очищают от загрязнений, измельчают, прессуют в брикеты и отправляют на другие заводы, где им дается вторая жизнь, а органику компостируют и делают удобрения. Неперерабатываемые отходы прессуют и отвозят на свалку для захоронения. В них нет бумаги и пластика, поэтому риск возникновения возгораний уменьшается; также спрессованные брикеты занимают меньше места.

Рассматривая показания датчиков загрязнения воздуха, можно с уверенностью сказать – на содержание взвешенных частиц в атмосфере во многом влияет влажность воздуха. Это подчеркивает необходимость влажной уборки в городе и ее влияние на подавление распространения аэрозольного загрязнения в окружающей среде [8]. Возгорание мусора на полигоне приводит к резкому ухудшению и так не очень благоприятной ситуации. Поэтому мусорный полигон представляет собой опасность как для местных жителей, так и экологической обстановки города в целом. На нем часто происходят возгорания, что негативно сказывается на состоянии атмосферного воздуха; инфильтрат с полигона попадает в почву и подземные воды, загрязняя их. Решением данной проблемы может стать строительство мусороперерабатывающего завода, но не расширение полигона, и это является важнейшей предпосылкой развития города, поскольку емкость существующего полигона исчерпана.

### **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. Добровольский В.В. Основы биогеохимии. М. 1998. – 413 с.
2. Дьяченко В.В. Геохимия и оценка состояния ландшафтов Северного Кавказа // Диссертация на соискание ученой степени доктора географических наук / Южный федеральный университет. Ростов-на-Дону, 2004. 326 с.
3. Куля Д.Н., Дьяченко В.В., Мореходов А.А., Терновский Я.В. Мониторинг аэрозольного загрязнения атмосферного воздуха. Экологическая география: современные векторы в науке : сб. науч. тр. / отв. за вып. А. Г. Максименко. – Краснодар : КубГАУ, 2024. – Вып. 3. – 273 с.
4. Дьяченко В.В. Формирование аномалий тяжелых металлов на геохимических барьерах в почвах под воздействием интенсивной ветровой эрозии // Геохимические барьеры в зоне гипергенеза. Москва, 1999. С. 163-166.
5. Касимов Н.С., Власов Д.В., Кошелева Н.Е. Химический состав дорожной пыли и ее фракции PM10 как индикатор загрязнения городской среды // Экология и промышленность России. – 2021. – Т. 25, № 10. – С. 43–49.
6. Дьяченко В.В., Демичев Н.В., Мужева В.Ю., Прокопенко П.В. Проблемы техносферной безопасности Российского Причерноморья // Труды 20-й Международной конференции Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии и геоэкологии. Новороссийск. 2012. С. 109-112
7. Сайт «За чистый Новороссийск». URL: <https://vk.com/zachin23>. (Дата обращения: 16.12.2024).

8. Малыхин Ю.А., Малыхина А.Г., Дьяченко В.В. Медико-экологические исследования урбанизированных территорий // Безопасность в техносфере. – № 3. – 2008. – С. 16–21.
9. Дьяченко В.В., Шеманин В.Г., Вишневецкая В.В. Влияние техногенеза и геохимии аэрозолей на состояние окружающей среды и здоровье населения Юга России // География и природные ресурсы. – 2023. – Т. 44, № 4. – С. 46-58. – DOI 10.15372/GIPR20230405.
10. Дьяченко В.В., Куля Д.Н., Мореходов А.А. Оптический мониторинг аэрозольного загрязнения воздуха в г. Новороссийске // Лазеры. Измерения. Информация. – 2024. – Т. 4, № 3. – С. 37-45.
11. Касимов Н.С., Власов Д.В. Технофильность химических элементов в конце XX начале XXI в. // Геохимия ландшафтов и география почв. 100 лет со дня рождения М.А. Глазовской – М.: АПР, 2012. – С. 143–156.
12. Малыхин Ю.А., Дьяченко В.В. Геоэкологические аспекты безопасности жизнедеятельности населения в городах Краснодарского края и Ростовской области // Безопасность жизнедеятельности. – 2003. – № 9. – С. 13–20.
13. Дьяченко В.В., Матасова И.Ю. Региональные кларки химических элементов в почвах юга европейской части России // Почвоведение, № 10, 2016. С. 1159-1166.
14. Управление городской средой: социально-экономические и экологические аспекты (на примере Новороссийска): монография / В.В. Дьяченко [и др.]. - Краснодар: Изд. ФГБОУВО «КубГТУ», 2021.-247 с.
15. Lanzerstorfer Ch. Heavy metals in the finest size fractions of road-deposited sediments // Environmental Pollution. – 2018. – Vol. 239. –P. 522–531.

### **Laser sensing of aerosol pollution of atmospheric air over the landfill in Novorossiysk**

Dyachenko V.V., Kulya D.N.

*Novorossiysk Polytechnic Institute (branch) Kuban State Technological University, Novorossiysk, Russia*

\*email: v-v-d@mail.ru, [Dashshok2020@gmail.com](mailto:Dashshok2020@gmail.com)

The article is devoted to the analysis of the results of monitoring aerosol pollution of the atmosphere of the city of Novorossiysk using laser probing methods. Monitoring consists of installing optical air quality sensors that monitor the content of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> particles in the atmospheric air. The specificity of the placement of the considered sensors is that they are located near the Novorossiysk city garbage landfill. During the considered period, the most important factor in the formation of aerosol pollution was fires at the landfill. The study of the factors exceeding the maximum permissible concentrations (MPC) of pollutants indicates a sharp increase in aerosols in the air due to the fire, which can negatively affect human health.

*Keywords: sensors, aerosols, microplastics, maximum permissible concentrations.*

### **References**

1. Dobrovolsky V.V. Fundamentals of Biogeochemistry. Moscow, 1998. – 413 p.
2. Dyachenko V.V. Geochemistry and Assessment of Landscape Conditions in the North Caucasus // Dissertation for the Degree of Doctor of Geographical Sciences / Southern Federal University. Rostov-on-Don, 2004. 326 p.
3. Kulya D.N., Dyachenko V.V., Morekhodov A.A., TernovskyYa.V. Monitoring Aerosol Pollution of Atmospheric Air. Environmental Geography: Modern Vectors in Science: Coll. of Research Papers / Responsible for Issue A.G. Maksimenko. – Krasnodar: KubSAU, 2024. – Issue 3. – 273 p.
4. Dyachenko V.V. Formation of heavy metal anomalies on geochemical barriers in soils under the influence of intense wind erosion // Geochemical barriers in the hypergenesis zone. Moscow, 1999. Pp. 163-166.
5. Kasimov N.S., Vlasov D.V., Kosheleva N.E. Chemical composition of road dust and its PM10 fraction as an indicator of urban pollution // Ecology and Industry of Russia. - 2021. - Vol. 25, No. 10. - Pp. 43-49.
6. Dyachenko V.V., Demichev N.V., MuzhevaV.Yu., Prokopenko P.V. Problems of technosphere safety of the Russian Black Sea region // Proceedings of the 20th International Conference Laser Information Technologies in Medicine, Biology and Geocology. Novorossiysk. 2012. P. 109-112.
7. Website "For a Clean Novorossiysk". URL: <https://vk.com/zachin23>. (Accessed: 16.12.2024).
8. MalykhinYu.A., Malykhina A.G., Dyachenko V.V. Medical and ecological studies of urbanized territories // Safety in the technosphere. - No. 3. - 2008. - P. 16-21.
9. Dyachenko V.V., Shemanin V.G., Vishnevetskaya V.V. The influence of technogenesis and aerosol geochemistry on the state of the environment and health of the population of the South of Russia // Geography and natural resources. – 2023. – V. 44, No. 4. – P. 46-58. – DOI 10.15372/GIPR20230405.
10. Dyachenko V.V., Kulya D.N., Morekhodov A.A. Optical monitoring of aerosol air pollution in Novorossiysk // Lasers. Measurements. Information. - 2024. -V. 4, No. 3. - P. 37-45.
11. Kasimov N.S., Vlasov D.V. Technophilicity of Chemical Elements at the End of the 20th – Beginning of the 21st Century // Landscape Geochemistry and Soil Geography. 100th Anniversary of M.A. Glazovskaya's Birth – Moscow: APR, 2012. – P. 143–156.
12. MalykhinYu.A., Dyachenko V.V. Geocological Aspects of Life Safety of the Population in the Cities of the Krasnodar Territory and Rostov Region // Life Safety. – 2003. – No. 9. – P. 13–20.
13. Dyachenko V.V., MatasovaI.Yu. Regional clarkes of chemical elements in soils of the south of the European part of Russia // Soil Science, No. 10, 2016. P. 1159-1166.
14. Urban environment management: socio-economic and environmental aspects (using Novorossiysk as an example): monograph / V.V. Dyachenko [et al.]. - Krasnodar: Publ. FGBOU VO "KubSTU", 2021.-247 p.
15. Lanzerstorfer Ch. Heavy metals in the finest size fractions of road-deposited sediments // Environmental Pollution. - 2018. - Vol. 239. - P. 522-531.