

## КОНТРОЛЬ ДОСТОВЕРНОСТИ ПОКАЗАНИЙ СПЕКТРОРАДИОМЕТРА В УСЛОВИЯХ ЗАПЫЛЕННОЙ АТМОСФЕРЫ

Р.Н. Садовников

krz525@mail.ru

И.В. Кудымова

irina.kudymova.83@mail.ru

А.С. Самородов

ФГБУ «33 ЦНИИИ» Минобороны России, Вольск-18,  
Саратовская обл., Российская Федерация

---

### Аннотация

Рассмотрена возможность контроля достоверности результата работы инфракрасного спектрометра при регистрации токсичного химиката в запыленной атмосфере. Предложен метод оценки интегральной концентрации аэрозольных частиц на основе определения изменения контраста тестового объекта относительно фона в видимом диапазоне длин волн при прохождении газоаэрозольного облака. Критическое значение контраста, соответствующее концентрации аэрозоля, когда уже невозможно срабатывание спектрометра на наличие в воздухе токсичного химиката, предложено определять на основе численного решения задачи переноса излучения в среде с заданными параметрами. Изложены результаты решения задачи для мешающего аэрозоля, состоящего из капель воды диаметром 5...20 мкм. Показано, что при значении отношения сигнал/шум 100 возможна регистрация токсичного химиката при концентрации аэрозоля до 5 г/м<sup>2</sup>. Реализация предложенного метода предполагает использование видеокамеры для наблюдения за тестовым объектом и компьютера для обработки получаемых изображений

### Ключевые слова

*Аварийный выброс, достоверность результатов, газоаэрозольное облако, контраст, спектрометр, тестовый объект*

Поступила 17.04.2018

© Автор(ы), 2019

---

**Введение.** В настоящее время появление заражения воздуха и отслеживание перемещения облака токсичного химиката возможно практически в режиме реального времени. Одними из наиболее эффективных технических средств, которые позволяют реализовать такую возможность, являются спектрометры, работающие в инфракрасном диапазоне длин волн [1]. Применение таких приборов для контроля обстановки на

предприятиях химической промышленности позволит в случае аварии обеспечить принятие неотложных мер по защите персонала и населения.

Аварийные выбросы могут сопровождаться взрывами, в результате которых происходит бризантное дробление окружающих объектов [2–4]. Вследствие этого, даже если токсичный химикат в условиях свободной атмосферы является газообразным веществом, в результате аварии с высокой вероятностью сформируется газоаэрозольное облако.

Содержащийся в облаке аэрозоль, не представляя угрозы для людей, является одним из мешающих факторов распознавания наличия в воздухе токсичного химиката. Результаты анализа маскирующей роли аэрозольного компонента облака при распознавании газообразной токсичной примеси с использованием инфракрасного спектрорадиометра приведены в работе [5]. Показано, что отсутствие срабатывания спектрорадиометра, нацеленного на облако выброса, еще не означает, что в воздухе отсутствуют токсичные химикаты, опасные для человека. Для окончательного вывода необходимо решить задачу оценки концентрации в облаке мешающего аэрозоля, а затем определить возможность срабатывания спектрорадиометра.

В настоящее время определение концентрации аэрозоля в воздухе возможно несколькими способами. Наиболее простой и распространенный способ заключается в применении ловушек, использующих методы фильтрации, импакции и аспирации [6–8]. Однако такой подход нецелесообразен вследствие его низкой оперативности. Действительно, значения концентрации могут быть получены только после прохождения облака, съема ловушек и обработки полученных данных.

Оценка параметров аэрозольного компонента облака может быть осуществлена практически в режиме реального времени с помощью лидарной системы. Использование многочастотного зондирования позволяет оценить микрофизические характеристики аэрозоля и вычислить его концентрацию [9, 10]. Однако несмотря на привлекательность такого способа, он обладает определенными недостатками. В первую очередь это относится к тому, что в настоящее время серийно не выпускают подобных устройств, а разработка единичного образца потребует значительных затрат. Кроме того, затруднительно обеспечить непрерывную работу лидара в течение длительного периода времени, так как это потребует достаточно частого обслуживания, предполагающего наличие специального высококвалифицированного персонала.

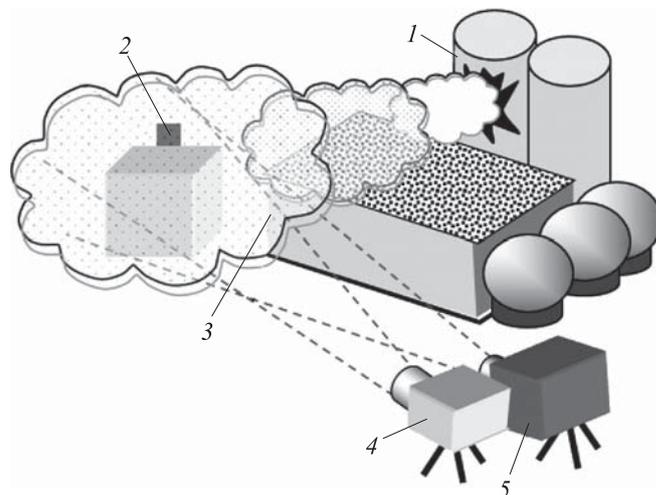
Указанные трудности обуславливают необходимость разработки метода для определения параметров аэрозольного компонента облака, об-

ладающего высокой оперативностью и не требующего использования оригинальной дорогостоящей аппаратуры.

**Постановка задачи.** Пылевой компонент газоаerosольного облака оказывает маскирующее воздействие при регистрации спектров поглощения газового компонента за счет рассеяния и поглощения излучения в инфракрасной области спектра. Следует отметить, что рассеяние и поглощение излучения будет происходить и в видимой области спектра.

Следовательно, концентрацию aerosоля можно оценивать по снижению контраста в оптическом диапазоне изображения некоторого объекта до аварии и изображения, полученного в момент, когда облако выброса расположено между фиксируемым объектом и регистрирующей аппаратурой. Далее, зная оценку концентрации aerosоля, можно сделать вывод о возможности срабатывания спектрорадиометра, работающего в инфракрасном диапазоне.

В качестве регистрирующей аппаратуры можно использовать серийно выпускаемый образец цифровой фото- или видеокамеры. Подключение регистрирующей аппаратуры к компьютеру позволит периодически получать и обрабатывать изображение тестового объекта в целях определения его контраста, например, на фоне открытого неба. Схема расположения аппаратуры и тестового объекта приведена на рисунке.



Расположение регистрирующей аппаратуры и тестового объекта относительно газоаerosольного облака выброса:

1 — аварийный объект; 2 — тестовый объект; 3 — газоаerosольное облако, содержащее токсичный химикат; 4 — видеокамера; 5 — спектрорадиометр

Если затем решить обратную задачу распространения света в рассеивающей среде, то будет получено значение концентрации aerosоля в об-

лаке, что позволит сделать вывод о возможности срабатывания спектро-  
радиометра при наличии токсичного вещества в виде газового компо-  
нента облака выброса.

**Анализ процесса снижения контраста изображения облаком вы-  
броса.** Если яркость объекта обозначить через  $B_o$ , а яркость — фона через  $B_\phi$ , то контраст между ними можно описать формулой [6]:

$$L = \frac{B_o - B_\phi}{B_o}.$$

В более общем случае, когда соотношение яркостей отдельных частей  
изображения может быть произвольным, выражение для определения  
контраста имеет вид

$$L = \frac{|B_o - B_\phi|}{B_o + B_\phi}.$$

Наличие аэрозоля между объектом и наблюдателем приводит к  
ослаблению световых лучей, идущих от предмета и фона, и к рассеянию  
аэрозолем света, поступающего со всех других направлений. Яркость  
объекта  $B_o$ , перед которым находится облако аэрозоля, можно оценить  
по соотношению

$$B_o(H) = B_o \exp(-\sigma C_N H), \quad (1)$$

где  $\sigma$  — сечение рассеяния излучения одной частицей;  $C_N$  — счетная кон-  
центрация аэрозольных частиц;  $H$  — толщина слоя аэрозоля. В этом слу-  
чае яркость фона

$$B_\phi(H) = B_\phi \exp(-\sigma C_N H). \quad (2)$$

Внешний свет, рассеянный аэрозолем, создает свечение, яркость ко-  
торого  $G$  накладывается на яркость объекта и фона. В этих условиях кон-  
траст [6]

$$L = \frac{B_o(H) - B_\phi(H)}{B_o(H) + B_\phi(H)} = \frac{|B_o - B_\phi| \exp(-\sigma C_N H)}{(B_o + B_\phi) \exp(-\sigma C_N H) + G}. \quad (3)$$

В рамках рассматриваемой задачи можно полагать, что светорассеива-  
ющие частицы равномерно заполняют все пространство и их число в еди-  
нице объема достаточно велико. В этом случае интенсивности являются  
(приближенно) непрерывными функциями толщины светорассеивающего  
слоя, и можно применять методы дифференциального исчисления.

Отражение, рассеяние вперед и поглощение света слоем единичной толщины можно описать с использованием коэффициентов

$$r = C_N \sigma_n^{(s)}(m, d); \quad t = C_N \sigma_v^{(s)}(m, d); \quad \mu = C_N \sigma^{(a)}(m, d),$$

где  $\sigma_n^{(s)}(m, d)$  — интегральное сечение рассеяния частицей электромагнитного излучения в диапазоне углов  $\pi/2 \dots \pi$ ;  $\sigma_v^{(s)}(m, d)$  — интегральное сечение рассеяния частицей электромагнитного излучения в диапазоне углов  $0 \dots \pi/2$ ;  $\sigma^{(a)}$  — интегральное сечение поглощения частицей электромагнитного излучения;  $d$  — диаметр частицы;  $m$  — комплексный показатель преломления вещества аэрозоля.

Счетную концентрацию легко определить, зная массовую концентрацию монодисперсного аэрозоля:

$$C_N = \frac{6C}{\pi \rho d^3},$$

где  $C$  — массовая концентрация аэрозоля в воздухе;  $\rho$  — плотность вещества аэрозоля.

Очевидно, что суммарное ослабление прямого излучения будет определяться суммой всех коэффициентов  $\alpha = t + r + \mu$ . При этом коэффициент  $\alpha$  представляет собой  $C_N \sigma$  из соотношений (1)–(3).

Электромагнитное излучение в рассеивающем слое можно разложить на два потока: первый распространяется по направлению падающего излучения, второй — навстречу ему. Первый поток состоит из нерассеянного света и света, испытавшего одно, два или более рассеяний; второй создается только рассеянным светом. Представим рассеянное излучение в виде суммы потоков однократно и более раз рассеянного света. Обозначим световые потоки  $k$ -й кратности, рассеянные по направлению и навстречу падающему излучению, через  $I_k^{(1)}$  и  $I_k^{(2)}$  соответственно, где  $k = 1, 2, \dots$  [11].

Рассмотрим прохождение света через бесконечно тонкий слой  $dz$ , находящийся на глубине  $z$ . Если интенсивность света на глубине  $z$  равна  $I_z^{(1)}$ , то при прохождении через слой  $dz$  часть его рассеется, часть поглотится, а некоторая часть пройдет без рассеяния. Предположим, что рассеяние вперед и назад (отражение), а также поглощение слоем  $dz$  можно полагать пропорциональным толщине  $dz$ . Тогда доля света, отраженного слоем  $dz$ , равна  $I^{(1)} r dz$ , рассеянного вперед —  $I^{(1)} t dz$ , поглощенного —  $I^{(1)} \mu dz$ , а прошедшего без рассеяния —  $I^{(1)} [1 - (r + t + \mu)]$ .

Изменение интенсивности прямого света в слое  $dz$ , обусловленное рассеянием и поглощением, имеет вид

$$\frac{dI^{(1)}}{dz} = -\alpha I^{(1)}.$$

Интенсивность однократно рассеянного вперед света уменьшается в результате рассеяния и поглощения и увеличивается за счет рассеяния прямого света в слое  $dz$ :

$$\frac{dI_1^{(1)}}{dz} = -\alpha I_1^{(1)} + tI^{(1)}.$$

Изменение интенсивности рассеянного  $k$ -й раз света происходит по тем же причинам, что и однократно, но световой поток  $I_k^{(1)}$  дополнительно пополняется в результате отражения рассеянного света  $(k-1)$ -й кратности, распространяющегося назад:

$$\frac{dI_k^{(1)}}{dz} = -\alpha I_k^{(1)} + rI_{k-1}^{(2)} + tI_{k-1}^{(1)}.$$

Получим систему уравнений для света, рассеянного навстречу падающему излучению:

$$\begin{aligned} -\frac{dI_1^{(2)}}{dz} &= -\alpha I_1^{(3)} + rI^{(1)}; \\ -\frac{dI_k^{(2)}}{dz} &= \alpha I_k^{(2)} + rI_{k-1}^{(1)} + tI_{k-1}^{(2)}. \end{aligned}$$

Граничные условия:

– падающее излучение на передней границе рассеивающего слоя имеет начальную интенсивность  $I_0$ :  $I^{(1)}(0) = I_0$ ;

– рассеянное вперед произвольное число раз излучение на передней границе рассеивающего слоя полностью отсутствует:  $I_k^{(1)}(0) = 0$ ;

– рассеянное назад произвольное число раз излучение на задней границе рассеивающего слоя полностью отсутствует:  $I_k^{(2)}(H) = 0$ , где  $H$  — толщина рассеивающего слоя.

Последовательное решение приведенных уравнений необходимо вести вплоть до учета  $N$ -кратного рассеяния света, пока не будет выполнено условие

$$I^{(1)}(H) + \sum_{k=1}^N I_k^{(1)}(H) + \sum_{k=1}^N I_k^{(2)}(0) \approx I_0.$$

Будем полагать, что в качестве фонового объекта используется квадрат черного цвета. Поскольку яркость такого объекта равна нулю, выражение (3) принимает вид

$$L = \frac{B_{\phi} \exp(-\sigma n H)}{B_{\phi} \exp(-\sigma n H) + G}. \quad (4)$$

Учитывая, что цветопередача видеоаппаратуры близка к идеальной, выражение (4) можно переписать следующим образом:

$$L = \frac{I^{(1)}(H)}{I^{(1)}(H) + \sum_{k=1}^N I_k^{(1)}(H)}.$$

**Вариант решения задачи контроля показаний спектрорадиометра.** Результаты расчетов значений контраста тестового объекта при различных концентрациях аэрозоля приведены в таблице. Ширина факела выброса выбрана равной 50 м, плотность вещества аэрозоля — 1 г/см<sup>3</sup>. При проведении расчетов предполагалось, что коэффициент преломления составлял 1,33. Факторы эффективности рассеяния и поглощения электромагнитной энергии выбраны равными [12]:

$$K_v = 4\sigma_v^{(s)} / (\pi d^2) = 2,1; \quad K_n = 4\sigma_n^{(s)} / (\pi d^2) = 0,1; \quad K_a = 4\sigma^{(a)} / (\pi d^2) = 0.$$

**Результаты расчетов значений контраста тестового объекта при различных концентрациях аэрозоля**

Концентрация аэрозоля $C_a$ , г/м <sup>2</sup>	Диаметр аэрозольных частиц, мкм		
	5	10	20
0,25	0,854	0,924	0,961
0,5	0,730	0,854	0,924
1	0,532	0,730	0,854
2,5	0,206	0,455	0,674
5	0,042	0,206	0,455
10	0,002	0,042	0,206

Данные, приведенные в таблице, можно аппроксимировать аналитической зависимостью

$$L = \exp\left(-3,15 \frac{C_a}{d}\right). \quad (5)$$

Преобразование выражения (5) относительно  $C_a$  дает результат

$$C_a = -0,317 \ln(L) d. \quad (6)$$

Оценочная формула для определения минимальной интегральной концентрации газообразного токсичного химиката, позволяющей распознать наличие опасности при заданном значении концентрации аэрозоля в облаке, предложена в работе [5]:

$$C_{\min} = -\frac{2 \cdot 10^7 m_{\mu}}{\sigma_{\Gamma}(\lambda_p) N_A} \ln \frac{1 + \sqrt{1 - 4 \exp[3 C_a K / (2d\rho)] \eta^{-1}}}{2}, \quad (7)$$

где  $m_{\mu}$  — молярная массы газообразного соединения;  $\sigma_{\Gamma}(\lambda_p)$  — сечение поглощения на резонансной частоте  $\lambda_p$  для одной молекулы;  $N_A$  — число Авогадро;  $d$  — медианное значение диаметра аэрозольных частиц;  $\eta$  — отношение сигнал/шум для спектрорадиометра;  $K$  — фактор эффективности рассеяния излучения аэрозольной частицей.

Из формулы (7) следует, что возрастание концентрации аэрозоля  $C_a$  требует наличия более высокой концентрации газообразной примеси  $C_{\min}$ . При этом максимальное значение концентрации аэрозоля, при котором может быть обнаружено наличие газовой примеси, определяется уравнением, получаемым из (7):

$$1 - 4 \exp[3 C_a K / (2d\rho)] \eta^{-1} = 0.$$

Решение имеет вид

$$C_a^{(кр)} = \frac{2 d\rho}{3K} \ln\left(\frac{\eta}{4}\right). \quad (8)$$

Формула (8) получена при условии, что отношение интенсивности излучения на резонансной частоте и интенсивность фонового излучения отличаются в 2 раза. Если интенсивности будут отличаться в большее число раз, то критическая концентрация аэрозоля будет больше. Следовательно, с помощью формулы (8) можно оценить снизу максимальную концентрацию, при которой существует вероятность, что спектрорадиометр не обнаружит в воздухе токсичный химикат.

Подставляя выражение (8) в (6) и выполняя тождественные преобразования, получаем формулу для определения критического значения контраста изображения черного квадрата:

$$L_{кр} = \exp\left[-\frac{2,1\rho}{K} \ln\left(\frac{\eta}{4}\right)\right]. \quad (9)$$

Поскольку плотность вещества аэрозоля выбрана равной  $1 \text{ г/см}^3$ , а  $K = K_v + K_n = 2,2$ , формула (9) для выбранных параметров принимает окончательный вид

$$L_{кр} = \left( \frac{\eta}{4} \right)^{-0,995}. \quad (10)$$

Согласно (10), при  $\eta = 10$  получаем  $L_{кр} = 0,402$ , а при  $\eta = 100$   $L_{кр} = 0,041$ . Сопоставляя вычисленные критические значения с данными, приведенными в таблице, устанавливаем, что при  $\eta = 10$  срабатывание спектрорадиометра возможно при интегральной концентрации мешающего аэрозоля до  $1 \text{ г/м}^2$ , а при  $\eta = 100$  возможно срабатывание и при концентрации до  $5 \text{ г/м}^2$ .

**Заключение.** Предложенный метод позволяет осуществлять оценку интегральной плотности аэрозоля в аварийном облаке выброса в режиме, близком к реальному времени, что делает возможным повышение достоверности показаний спектрорадиометра о наличии газообразных токсичных примесей при работе в наиболее сложных условиях. Определение невозможности срабатывания спектрорадиометра вследствие запыленности атмосферы позволит внести коррективы в принимаемые меры по защите персонала и населения, а также снизить вероятность поражения людей.

Для реализации метода требуется наличие цифровой видеокамеры, подключенной к компьютеру, а также специализированное программное обеспечение для обработки получаемых изображений тестового объекта. Это обуславливает его практическую значимость, так как делает возможным не только создание более совершенных систем контроля химической обстановки, но и достаточно простую модернизацию уже существующих систем в целях повышения их эффективности.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Морозов А.Н., Светличный С.И. Основы фурье-спектрорадиометрии. М., Наука, 2014.
- [2] Лебская Т.А. Прогнозирование чрезвычайных ситуаций на потенциально опасных производственных объектах. *Инженерный вестник*, 2016, № 2.  
URL: <http://engbul.bmstu.ru/doc/833854.html>
- [3] Соколов Э.М., Панарин В.М., Горюнкова А.А. и др. Совершенствование теории развития чрезвычайных ситуаций техногенного характера. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2010, № 4-2, с. 241–251.
- [4] Матвеев Ю.Н., Карельская К.А., Стукалова Н.А. и др. Структуры математических моделей аварийных и чрезвычайных ситуаций на химически опасных объектах. *Наукоедение*, 2016, т. 8, № 5.  
URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/89TVN516.pdf>

- [5] Садовников Р.Н., Бойко А.Ю., Шлыгин П.Е. Оценка влияния особенностей состава газоаэрозольного облака на спектр фонового излучения открытой атмосферы. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2013, № 4, с. 69–78.
- [6] Грин Х., Лейн В. Аэрозоли — пыли, дымы и туманы. Л., Химия, 1972.
- [7] Толчинский А.Д., Сигаев В.И., Варфоломеев А.Н. Современные тенденции развития технических средств пробоотбора и анализа биоаэрозолей. *Экологические системы и приборы*, 2008, № 11, с. 30–48.
- [8] Назаров Б.И., Абдуллаев С.Ф., Маслов В.А. и др. Исследование функции распределения аэрозольных частиц и вариация сажевого аэрозоля в атмосфере. *Доклады академии наук Республики Таджикистан*, 2010, т. 53, № 5, с. 358–363.
- [9] Зуев В.Е., Зуев В.В. Современные проблемы атмосферной оптики. Т. 8. Дистанционное оптическое зондирование атмосферы. СПб., Гидрометеиздат, 1992.
- [10] Боровлев А.Э., Кунгурцев С.А. Лидарный аппаратно-программный комплекс как элемент геоинформационной системы г. Белгорода. *Экологические приборы и системы*, 2008, № 11, с. 56–59.
- [11] Чекалинская Ю.И. О кратности рассеяния света. *Известия АН СССР*, 1957, т. 21, № 11, с. 1494–1499.
- [12] Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М., Наука, 1973.

**Садовников Роман Николаевич** — д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник ФГБУ «33 ЦНИИИ» Минобороны России (Российская Федерация, 412918, Саратовская обл., Вольск-18, ул. Краснознаменная, д. 1).

**Кудымова Ирина Владимировна** — научный сотрудник ФГБУ «33 ЦНИИИ» Минобороны России (Российская Федерация, 412918, Саратовская обл., Вольск-18, ул. Краснознаменная, д. 1).

**Самородов Александр Сергеевич** — канд. техн. наук, старший научный сотрудник ФГБУ «33 ЦНИИИ» Минобороны России (Российская Федерация, 412918, Саратовская обл., Вольск-18, ул. Краснознаменная, д. 1).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Садовников Р.Н., Кудымова И.В., Самородов А.С. Контроль достоверности показаний спектрорадиометра в условиях запыленной атмосферы. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2019, № 3, с. 34–45.

DOI: 10.18698/1812-3368-2019-3-34-45

## MONITORING RELIABILITY OF SPECTRORADIOMETER READINGS IN DUSTY ATMOSPHERIC CONDITIONS

R.N. Sadovnikov

krz525@mail.ru

I.V. Kudymova

irina.kudymova.83@mail.ru

A.S. Samorodov

33rd Central Scientific Research Institute of the Ministry of Defense  
of the Russian Federation, Volsk-18, Saratov Region, Russian Federation

---

### Abstract

The paper considers the possibility of monitoring reliability of infrared spectroradiometer operation when detecting the presence of a toxic chemical in a dusty atmosphere. We present a method for estimating cumulative concentration of aerosol particles based on evaluating variations in contrast of a test object against the background in the visible wavelength range during gas and aerosol cloud propagation. In order to determine the critical contrast value that corresponds to the aerosol concentration designating further inability of the spectroradiometer to detect the toxic chemical in the air, we propose to numerically solve the problem of radiation transfer in a medium with known parameters. We report the results of solving this problem for an interfering aerosol consisting of water droplets with a diameter of 5–20  $\mu\text{m}$ . We show that for a signal-to-noise ratio of 100 it is possible to detect a toxic chemical at aerosol concentrations of up to 5 g/m<sup>2</sup>. Implementing the method proposed involves using a video camera to monitor the test object and a computer to process the images recorded

### Keywords

*Accidental pollution, result reliability, gas and aerosol cloud, contrast, spectroradiometer, test object*

Received 17.04.2018

© Author(s), 2019

---

### REFERENCES

- [1] Morozov A.N., Svetlichnyy S.I. *Osnovy fur'ye-spektroradiometrii* [Fundamentals of Fourier-spectroscopy]. Moscow, Nauka Publ., 2014.
- [2] Lebskaya T.A. Forecasting emergency at potentially dangerous manufacturing sites. *Inzhenernyy vestnik* [Engineering Bulletin], 2016, no. 2 (in Russ.). Available at: <http://engbul.bmstu.ru/doc/833854.html>
- [3] Sokolov E.M., Panarin V.M., Goryunkova A.A., et al. Improvement of the theory of development emergency. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula State University. Technical Science], 2010, no. 4-2, pp. 241–251 (in Russ.).
- [4] Matveev Yu.N., Karel'skaya K.A., Stukalova N.A., et al. Structures of mathematical models of contingency and emergency situations on chemically dangerous objects. *Naukovedenie*, 2016, vol. 8, no. 5 (in Russ.). Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/89TVN516.pdf>

- [5] Sadovnikov R.N., Boyko A.Yu., Shlygin P.E. Estimation of influence of features of the gas-aerosol cloud composition on the background radiation spectrum of the exposed atmosphere. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2013, no. 4, pp. 69–78 (in Russ.).
- [6] Green H.L., Lane W.R. Particulate clouds: dusts, smoke, and mists. Their physics and physical chemistry and industrial and environmental aspects. Princeton, N.J., Van Nostrand, 1964.
- [7] Tolchinskiy A.D., Sigaev V.I., Varfolomeev A.N. Modern trends in development of technical means for bioaerosol sampling and analysis. *Ekologicheskie sistemy i pribory* [Ecological Systems and Devices], 2008, no. 11, pp. 30–48 (in Russ.).
- [8] Nazarov B.I., Abdullaev S.F., Maslov V.A., et al. Studies of the distribution of an aerosol particles and variation soot aerosols in the atmosphere. *Doklady akademii nauk Respubliki Tadjikistan*, 2010, vol. 53, no. 5, pp. 358–363 (in Russ.).
- [9] Zuev V.E., Zuev V.V. *Sovremennye problemy atmosfery optiki. T. 8. Distantionnoe opticheskoe zondirovanie atmosfery* [Today problems of atmosphere optics. Vol. 8. Optical remote sensing of the atmosphere]. St. Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 1992.
- [10] Borovlev A.E., Kungurtsev S.A. The hardware-software lidar complex as the element of geoinformation analytical system of city of Belgorod. *Ekologicheskie sistemy i pribory* [Ecological Systems and Devices], 2008, no. 11, pp. 56–59 (in Russ.).
- [11] Chekalinskaya Yu.I. On degree of light scatter. *Izvestiya AN SSSR*, 1957, vol. 21, no. 11, pp. 1494–1499 (in Russ.).
- [12] Born M., Wolf E. Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light. Oxford, Pergamon Press, 1965.

**Sadovnikov R.N.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Chief Research Scientist, 33rd Central Scientific Research Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation (Krasnoznamennaya ul., Volsk-18, Saratov Region, 412918 Russian Federation).

**Kudymova I.V.** — Researcher Scientist, 33rd Central Scientific Research Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation (Krasnoznamennaya ul., Volsk-18, Saratov Region, 412918 Russian Federation).

**Samorodov A.S.** — Cand. Sc. (Eng.), Senior Researcher, 33rd Central Scientific Research Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation (Krasnoznamennaya ul., Volsk-18, Saratov Region, 412918 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Sadovnikov R.N., Kudymova I.V., Samorodov A.S. Monitoring reliability of spectroradiometer readings in dusty atmospheric conditions. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2019, no. 3, pp. 34–45 (in Russ.). DOI: 10.18698/1812-3368-2019-3-34-45