

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ СОСТАВА ГАЗО-АЭРОЗОЛЬНОГО ОБЛАКА НА СПЕКТР ФОНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТКРЫТОЙ АТМОСФЕРЫ

Р.Н. Садовников, А.Ю. Бойко, П.Е. Шлыгин

ФГКУ “33ЦНИИИ” Минобороны России, Вольск-18, Российская Федерация  
e-mail: shlygin.pe@mail.ru

*Рассмотрено облако, содержащее газовый компонент, который необходимо идентифицировать спектрорадиометрическим методом, и аэрозоль, выступающий в качестве мешающего фактора. Разработана модель контроля загрязненности атмосферы, в которой рассматривается упругое рассеяние падающего света аэрозолем и его резонансное поглощение газовым компонентом. В рамках предложенной модели получено уравнение для определения минимальной концентрации идентифицируемого газового компонента при заданном отношении сигнал/шум спектрорадиометра. Получено аналитическое решение для частного случая, когда сечение поглощения на максимуме и минимуме интенсивности поглощения излучения в пределах рассматриваемой резонансной линии отличается в 2 раза. Показано, что уменьшение дисперсности аэрозольных частиц резко снижает возможность идентификации газового компонента. Согласно проведенным оценкам, если обеспечиваемое отношение сигнал/шум равно 10, то идентификация газообразной примеси невозможна уже при концентрации аэрозоля около  $20 \text{ г/м}^2$  при размере частиц  $10 \text{ мкм}$ .*

**Ключевые слова:** аварийный выброс, идентификация опасного вещества, газо-аэрозольное облако, спектр поглощения, спектрорадиометр.

## ESTIMATION OF INFLUENCE OF FEATURES OF THE GAS-AEROSOL CLOUD COMPOSITION ON THE BACKGROUND RADIATION SPECTRUM OF THE EXPOSED ATMOSPHERE

R.N. Sadovnikov, A.Yu. Boiko, P.E. Shlygin

The 33rd Central Research Test Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Volsk-18, Russian Federation  
e-mail: shlygin.pe@mail.ru

*A two-component cloud is considered, which contains a gas component to be identified using the spectroradiometric method and an aerosol appearing for the disturbing factor. The model of monitoring of the atmosphere pollution is developed, in which elastic scattering of the incident light by aerosol and its resonance absorption by the gas component are examined. An equation for determining a minimal concentration of the identifiable gas component at the specified signal-to-noise ratio of the spectroradiometer is derived in the context of the offered model. The analytical solution is obtained for the particular case, when the absorption cross-sections for the maximum and minimum of the radiation absorption intensity within the limits of the resonance line under consideration differ from each other by a factor of 2. It is shown, that reduction in the aerosol particle dispersion sharply decreases the capability of gas component identification. The conducted estimations have shown that if the provided signal-to-noise ratio is equal to 10, the gaseous contaminants identification is practically impossible already at an aerosol concentration of about  $20 \text{ г/м}^2$  when a particle size is equal to  $10 \text{ }\mu\text{m}$ .*

**Keywords:** emergency emission, dangerous substance identification, gas-aerosol cloud, absorption spectrum, spectroradiometer.

Непрерывное развитие средств и систем контроля экологической обстановки связано с вероятностью аварий, сопряженных с выбросом в окружающую среду опасных токсичных веществ [1–3]. В настоящее время быстрыми темпами развиваются дистанционные методы и средства определения состава облаков загрязняющих веществ [4–8]. Основой одного из наиболее эффективных подходов для регистрации опасных газообразных веществ в атмосфере является анализ спектрального состава фонового инфракрасного излучения, прошедшего облака примеси [9–12].

Для описания важных закономерностей влияния параметров облака газообразных загрязняющих веществ на возможность дистанционной идентификации его состава на основе анализа созданы математические модели, в достаточной степени позволяющие описать протекающие процессы и выработать необходимые практические рекомендации [13–17].

Недостаток существующих подходов — возможность изучения только газообразных примесей. В то же время на практике облака, образовавшиеся в результате выброса в атмосферу опасных веществ, наряду с газообразными примесями могут содержать аэрозоль. Появление аэрозоля может быть обусловлено различными причинами, включая бризантное дробление элементов производственного объекта при взрывах, сопровождающих аварию, конденсацию высококипящих компонентов выброса, продукты горения [18, 19].

В связи с этим рассмотрим четырехкомпонентную модель, включающую в себя:

- 1) облако газовой примеси, являющееся объектом индикации с помощью спектро радиометра;
- 2) аэрозольное облако, маскирующее газовое облако;
- 3) трассу в воздушной среде, по которой осуществляется прохождение регистрируемых электромагнитных волн;
- 4) объект, на фоне которого рассматривается спектральный состав излучения, прошедшего через атмосферные примеси.

Предположим, что газообразные и аэрозольные загрязнения являются компонентами единого газо-аэрозольного облака, протяженность которого вдоль трассы составляет  $L$ , а температура  $T_{об}$ . При этом оптическая толщина газового компонента равна

$$D_{г} = \sigma_{г} C_{г},$$

где  $\sigma_{г}$  — сечение поглощения, нормированное на массу примеси,  $\text{м}^2/\text{г}$ ;  $C_{г}$  — интегральная концентрация газообразной примеси на трассе,  $\text{г}/\text{м}^2$ .

Оптическая толщина аэрозольного компонента зависит от распределения частиц по размерам и может быть оценена по формуле

$$D_a = \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \sigma_a(R) C_a(R) dR,$$

где  $\sigma_a$  — сечение поглощения, нормированное на массу примеси,  $\text{м}^2/\text{г}$ ;  $C_a$  — концентрация аэрозоля,  $\text{г}/\text{м}^3$ ;  $R$  — характерный радиус аэрозольных частиц,  $\text{м}$ ;  $R_{\min}$ ,  $R_{\max}$  — минимальный и максимальный радиусы частиц, входящих в состав загрязнения,  $\text{м}$ .

Предположим также, что температура воздушной среды на трассе равна  $T_{\text{тр}}$ , а оптическая толщина трассы —  $D_{\text{тр}}$ .

В случае отсутствия облака будет регистрироваться излучение, имеющее две составляющие:

- 1) излучение фонового объекта, обладающее спектром  $\Phi_0(\lambda)$ , ослабленное при прохождении по воздушной трассе до спектрорадиометра;
- 2) тепловое излучение среды вдоль трассы.

С учетом частичного ослабления собственного излучения средой вдоль трассы общий спектр может быть аппроксимирован формулой [14]

$$B_0(\lambda) = \Phi_0(\lambda) e^{-D_{\text{тр}}} + \varepsilon(\lambda, T_{\text{тр}}) (1 - e^{-D_{\text{тр}}}), \quad (1)$$

где  $\varepsilon(\lambda, T_{\text{тр}})$  — расчетная функция Планка.

Газо-аэрозольное облако дополнительно трансформирует спектр фонового излучения и добавляет еще два компонента в общий поток излучения:

$$B(\lambda) = \Phi_0(\lambda) e^{-D_{\text{тр}}} e^{-(D_r + D_a)} + \varepsilon(\lambda, T_{\text{тр}}) (1 - e^{-D_{\text{тр}}}) + \varepsilon(\lambda, T_{\text{об}}) (1 - e^{-D_r}) e^{-(D_{\text{тр}} + D_a)} + \varepsilon(\lambda, T_{\text{об}}) (1 - e^{-D_a}) e^{-(D_{\text{тр}} + D_r)}.$$

Проведем тождественные преобразования и получим из выражения (1) спектр фонового излучения

$$\Phi_0(\lambda) = [B_0(\lambda) - \varepsilon(\lambda, T_{\text{тр}}) (1 - e^{-D_{\text{тр}}})] e^{D_{\text{тр}}}. \quad (2)$$

Подставляя (2) в выражение для спектра при наличии объекта индикации, получаем спектр излучения при наличии газо-аэрозольного облака, выраженный через спектр чистой трассы:

$$B(\lambda) = [B_0(\lambda) - \varepsilon(\lambda, T_{\text{тр}}) (1 - e^{-D_{\text{тр}}})] e^{-(D_r + D_a)} + \varepsilon(\lambda, T_{\text{тр}}) (1 - e^{-D_{\text{тр}}}) + \varepsilon(\lambda, T_{\text{об}}) (1 - e^{-D_r}) e^{-D_a} e^{-D_{\text{тр}}} + \varepsilon(\lambda, T_{\text{об}}) (1 - e^{-D_a}) e^{-D_r} e^{-D_{\text{тр}}}. \quad (3)$$

Проведя преобразования, получаем выражение для коэффициента пропускания излучения газового компонента облака

$$K_{\Gamma}(\lambda) = e^{-D_{\Gamma}} = [B(\lambda) - \varepsilon(\lambda, T_{\text{ТР}})(1 - e^{-D_{\text{ТР}}}) - \varepsilon(\lambda, T_{\text{Об}})e^{-D_{\text{а}}}e^{-D_{\text{ТР}}}] \times \{ [B_0(\lambda) - \varepsilon(\lambda, T_{\text{ТР}})(1 - e^{-D_{\text{ТР}}})] e^{-D_{\text{а}}} - \varepsilon(\lambda, T_{\text{Об}})e^{-D_{\text{а}}}e^{-D_{\text{ТР}}} + \varepsilon(\lambda, T_{\text{Об}})(1 - e^{-D_{\text{а}}})e^{-D_{\text{ТР}}} \}^{-1}. \quad (4)$$

Выражение (4) упрощается в случае теплового равновесия между облаком и воздушной средой на трассе:  $T_{\text{ТР}} \approx T_{\text{Об}} \equiv T$ . С учетом этого выражение (4) принимает вид

$$K_{\Gamma}(\lambda) = e^{-D_{\Gamma}} = \frac{B(\lambda) - \varepsilon(\lambda, T) + \varepsilon(\lambda, T)(1 - e^{-D_{\text{а}}})e^{-D_{\text{ТР}}}}{[B_0(\lambda) - \varepsilon(\lambda, T)]e^{-D_{\text{а}}} + \varepsilon(\lambda, T)(1 - e^{-D_{\text{а}}})e^{-D_{\text{ТР}}}}. \quad (5)$$

Когда аэрозольный компонент облака отсутствует, что формально равносильно полному пропусканию излучения аэрозолем ( $e^{-D_{\text{а}}} = 1$ ), выражение (4) аналогично выражению для коэффициента пропускания газового облака, приведенному в работе [10]:

$$K_{\Gamma}(\lambda) = e^{-D_{\Gamma}} = \frac{B(\lambda) - \varepsilon(\lambda, T)}{[B_0(\lambda) - \varepsilon(\lambda, T)]}. \quad (6)$$

Модель для газового облака (6) позволяет в случае наличия сведений о значении отношения сигнал/шум для спектрорадиометра установить минимальную концентрацию примеси, которая может быть зарегистрирована. Модернизированная модель такой возможности не предоставляет. Решение, полученное с ее помощью, указывает на то, что с увеличением концентрации аэрозоля минимальная концентрация газообразной примеси, которая может быть зарегистрирована, не повышается, как это следует из физического смысла протекающих процессов, а уменьшается.

Подобное противоречие связано с тем, что модель (5) так же, как и модель (6), позволяет только оценить возможность идентификации облака, а не определить состав его газообразного компонента. Поскольку в исходном уравнении описание газообразного компонента полностью аналогично описанию аэрозольного компонента, то минимальное изменение потока излучения, обеспечивающее определение факта наличия облака, складывается из влияния каждого компонента. Если основное изменение потока излучения обусловлено аэрозолем, то добавочное изменение — влиянием газового компонента. При этом требуемую для этого концентрацию газа не следует рассматривать, как минимально обнаружимую, так как в рамках данной модели оценивается возможность обнаружения всего облака как единого объекта.

Для преодоления указанной трудности необходимо учесть тот факт, что сечение рассеяния аэрозольной частицей излучения в узком диапазоне длин волн  $[\lambda, \lambda + \Delta\lambda]$  имеет практически одинаковое значение [20]. Для газа это сечение может существенно различаться. Если длина волны  $\lambda$  соответствует центру линии поглощения, то при превышении  $\Delta\lambda$  полуширины линии поглощения сечения поглощения (излучения) на длинах волны  $\lambda$  и  $\lambda + \Delta\lambda$  могут различаться во много раз [21]. При этом минимальная концентрация газового компонента может быть зарегистрирована, когда разность интенсивности излучения (поглощения) на длинах волны  $\lambda$  и  $\lambda + \Delta\lambda$  не меньше значения, соответствующего интенсивности шума в приемном тракте прибора:

$$|B(\lambda + \Delta\lambda) - B(\lambda)| \geq \delta B.$$

Представим (3) в следующем виде:

$$\begin{aligned} B(\lambda) = & \\ = & \{ [B_0(\lambda) - \varepsilon(\lambda, T_{\text{тр}})] e^{-D_a} + [\varepsilon(\lambda, T_{\text{тр}}) - 2\varepsilon(\lambda, T_{\text{об}})] e^{-D_a} e^{-D_{\text{тр}}} + \\ & + \varepsilon(\lambda, T_{\text{об}}) e^{-D_{\text{тр}}} \} e^{-D_r} + \varepsilon(\lambda, T_{\text{об}}) e^{-D_a} e^{-D_{\text{тр}}} + \varepsilon(\lambda, T_{\text{тр}}) (1 - e^{-D_{\text{тр}}}). \end{aligned}$$

Слагаемое, в котором содержится множитель  $e^{-D_r}$ , будет меняться при изменении длины волны с  $\lambda$  на  $\lambda + \Delta\lambda$ . Как было отмечено выше, остальные слагаемые практически будут постоянны. Следовательно, справедливо равенство

$$\begin{aligned} B(\lambda + \Delta\lambda) - B(\lambda) = & \\ = & \{ [B_0(\lambda) - \varepsilon(\lambda, T_{\text{тр}})] e^{-D_a} + [\varepsilon(\lambda, T_{\text{тр}}) - 2\varepsilon(\lambda, T_{\text{об}})] e^{-D_a} e^{-D_{\text{тр}}} + \\ & + \varepsilon(\lambda, T_{\text{об}}) e^{-D_{\text{тр}}} \} [e^{-D_r(\lambda + \Delta\lambda)} - e^{-D_r(\lambda)}]. \end{aligned}$$

Откуда получаем уравнение для определения минимальной концентрации газового компонента газо-аэрозольного облака, при которой его идентификация возможна:

$$\eta^{-1} = \left\{ e^{-D_a} + \frac{\varepsilon(\lambda, T_{\text{об}}) + [\varepsilon(\lambda, T_{\text{тр}}) - 2\varepsilon(\lambda, T_{\text{об}})] e^{-D_a}}{B_0(\lambda) - \varepsilon(\lambda, T_{\text{тр}})} e^{-D_{\text{тр}}} \right\} \times [e^{-D_r(\lambda + \Delta\lambda)} - e^{-D_r(\lambda)}], \quad (7)$$

где  $\eta$  — отношение сигнал/шум для рассматриваемого типа спектрометра.

Для анализа уравнения (7) упростим его, приняв, что облако находится в термодинамическом равновесии с воздушной средой ( $T_{\text{об}} \approx T_{\text{тр}}$ ), а измерения проводятся при высокой дальности видимости

сти ( $e^{-D_{\text{тp}}} \approx 1$ ):

$$\eta^{-1} = \left[ e^{-D_a} + \frac{\varepsilon(\lambda, T)(1 - e^{-D_a})}{B_0(\lambda) - \varepsilon(\lambda, T)} \right] [e^{-D_r(\lambda + \Delta\lambda)} - e^{-D_r(\lambda)}].$$

Предположим также, что концентрация аэрозоля небольшая, тогда

$$\eta^{-1} = e^{-D_a} [e^{-D_r(\lambda + \Delta\lambda)} - e^{-D_r(\lambda)}]. \quad (8)$$

Уравнение (8) можно привести к степенному виду

$$z^k - z + e^{D_a}\eta^{-1} = 0, \quad (9)$$

где  $z = e^{-D_r(\lambda + \Delta\lambda)}$ ;  $k = \sigma_r(\lambda) / \sigma_r(\lambda + \Delta\lambda)$ ;  $D_r(\lambda + \Delta\lambda) = \sigma_r(\lambda + \Delta\lambda)C_r$ ;  $D_r(\lambda) = \sigma_r(\lambda)C_r$ .

В случае, когда выбранные длины волны не соответствуют какой-либо линии поглощения, уравнение (9) становится нерешаемым, в связи с чем невозможно идентифицировать газообразную примесь. Наиболее простое аналитическое решение может быть получено при  $k = 2$ :

$$C_{\min} = -\frac{2}{\sigma(\lambda_p)} \ln \frac{1 + \sqrt{1 - 4e^{D_a}\eta^{-1}}}{2}, \quad (10)$$

где  $C_{\min}$  — минимальная интегральная концентрация газообразного соединения, мг/м<sup>2</sup>;  $\sigma(\lambda_p)$  — сечение поглощения на резонансной частоте, г/м<sup>2</sup>.

Отметим, что выражение (10) весьма полезно, поскольку для большинства случаев дает оценку сверху минимальной концентрации газового компонента, которая может быть зарегистрирована.

Для проведения инженерных расчетов выражение (10) может быть преобразовано к виду

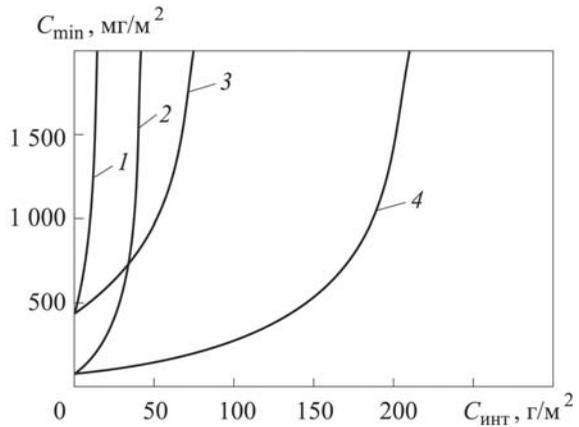
$$C_{\min} = -\frac{2 \cdot 10^7 m_\mu}{\sigma_a(\lambda_p) N_A} \ln \frac{1 + \sqrt{1 - 4((3C_{\text{инт}})/(2D_M \rho))\eta^{-1}}}{2}, \quad (11)$$

где  $\sigma_a(\lambda_p)$  — сечение поглощения на резонансной частоте для одной молекулы аэрозоля, см<sup>2</sup>;  $m_\mu$  — молярная масса газообразного соединения, г;  $N_A$  — число Авогадро;  $C_{\text{инт}}$  — интегральная концентрация аэрозоля на трассе наблюдения, г/м<sup>2</sup>;  $D_M$  — медианное значение диаметра аэрозольных частиц, мкм;  $\rho$  — плотность вещества аэрозоля, г/см<sup>3</sup>.

На рисунке приведены зависимости  $C_{\min}$  от  $C_{\text{инт}}$ , построенные с использованием (11), для оценки возможности идентификации наличия аммиака в облаке, содержащем пылевой компонент. При проведении расчетов предполагалось, что идентификация аммиака возможна при определении всех основных характерных линий поглощения. В связи с этим рассматривалась необходимость превышения интенсивности сигнала от наиболее слабой характерной линии над уровнем шума.

**Зависимость минимально допустимой концентрации газообразной примеси, при которой возможна ее идентификация, от концентрации аэрозоля:**

1 –  $\eta = 10$ ,  $D_M = 10$  мкм; 2 –  $\eta = 10$ ,  $D_M = 50$  мкм; 3 –  $\eta = 100$ ,  $D_M = 10$  мкм; 4 –  $\eta = 100$ ,  $D_M = 50$  мкм



Такая линия была выбрана на частоте  $1084 \text{ см}^{-1}$  (сечение поглощения  $1,577 \cdot 10^{-19} \text{ см}^2/\text{молекула}$  [22]).

Согласно представленной зависимости, если аэрозоль мелкодисперсный, то даже наличие значительной концентрации аммиака не сможет обеспечить получение характерного спектра поглощения для надежной идентификации примеси. Так, при обеспечиваемом отношении сигнал/шум 10, идентификация газообразной примеси невозможна уже при концентрации аэрозоля около  $20 \text{ г/м}^2$  и медианном размере частиц 10 мкм. Таким образом, когда облако имеет диаметр около 100 м, даже при равных массовых концентрациях газообразной примеси и аэрозоля провести идентификацию облака невозможно.

Наиболее благоприятные условия идентификации газообразной примеси обеспечиваются, если аэрозольные частицы крупные и возможно достижение большого значения сигнал/шум. При  $\eta = 100$  и  $D_M = 50$  мкм (кривая 4, см. рисунок) наличие газообразной примеси в концентрации  $1500 \text{ мг/м}^2$  позволит идентифицировать ее состав даже при концентрации аэрозоля до  $200 \text{ г/м}^2$ .

Естественно, что полученные оценки носят ориентировочный характер, поскольку при получении аналитического решения было выдвинуто условие о наличии достаточно небольшой концентрации аэрозольной примеси. Вместе с тем численное решение исходного уравнения вполне возможно, что может позволить точно проанализировать представляющую интерес ситуацию.

**Заключение.** Разработан подход, позволяющий определить минимальную концентрацию газового компонента газо-аэрозольного облака, при которой возможно идентифицировать его состав с учетом действия аэрозольного компонента.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахобадзе Г.Н. О загрязнении атмосферы и методах контроля ее состояния // Экология производства. 2010. № 1. С. 35–41.

2. *Molles M.C.* Ecology: concepts and applications. 4th ed. NY: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2008. 604 p.
3. *Короленко Л.И., Синецына О.Р.* Методы измерения концентрации загрязнений в промышленных выбросах // Экология производства. 2011. № 11. С. 50–53.
4. *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.
5. *Фокин М.В., Беспалов М.С., Оселедец Е.Ю., Успенская Т.М.* Контроль качества атмосферного воздуха на границе расчетной СЗЗ // Экология производства. 2010. № 4. С. 50–52.
6. *Snyde A.P., Jensen J.O., Maswadeh W.M.* et al. AIRIS remote detection for chemical vapor clouds: System design and detection algorithm // Lasers and ElectroOptics, 2007. Baltimore (Md.), 2007. P. 1–2. INSPEC Accession Number: 9851863, DOI: 10.1109/ CLEO 2007.4453375.
7. *Зуев В.Е., Зуев В.В.* Современные проблемы атмосферной оптики. Т. 8.: Дистанционное оптическое зондирование атмосферы. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 232 с.
8. *Bianchini G., Cortesi U., Palchetti L.* Emission Fourier transform spectroscopy for the remote sensing of the atmosphere // Optics and Lasers in Engineering. 2002. Vol. 37. P. 187–202.
9. *Проблемы аналитической химии.* Т. 13: Внелабораторный химический анализ; под ред. Ю.А. Золотова. М.: Наука, 2010. 504 с.
10. *Глазюлев К.В., Морозов А.Н., Назаренко Б.П.* и др. Мониторинг открытой атмосферы с помощью фурье-спектрометра // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2005. № 3 (18). С. 9–25.
11. *Shimoto A., Kobayashi H., Kadokura S.* Radiometric calibration for the airborne interferometric monitor for greenhouse gases simulator // Appl. Optics. 1999. Vol. 38. P. 571–576.
12. *Beil A., Daum R., Matz G.* Remote sensing of atmospheric pollutants by passive FTIR spectrometry // Proc. of SPIE. 1998. Vol. 3493. P. 32–43.
13. *Heland J., Schaffer K.* Analysis of aircraft exhaust with Fourier-transform infrared emission spectroscopy // Appl. Optics. 1997. Vol. 36. P. 4922–4931.
14. *Морозов А.Н., Светличный С.И.* Основы фурье-спектрометрики. М.: Наука, 2006. 275 с.
15. *Hoffland L., Piffath R., Bouk J.* Spectral signature of chemical agents and simulants // Optical Engineering. 1985. Vol. 24. No 6. P. 982–984.
16. *Кочиков И.В., Морозов А.Н., Светличный С.И., Фуфурин И.Л.* Распознавание веществ в открытой атмосфере по единичной интерферограмме фурье-спектрометра // Оптика и спектроскопия. 2009. Т. 106. № 5. С. 743–749.
17. *Дворук С.К., Корниенко В.Н., Кочиков И.В.* и др. Обработка двусторонних интерферограмм с учетом собственного фонового излучения фурье-спектрометра // Оптика и спектроскопия. 2002. Т. 93. № 5. С. 884–889.
18. *Замай С.С., Якубайлик О.Э.* Модели оценки и прогноза загрязнения атмосферы промышленными выбросами в информационно-аналитической системе природоохранных служб крупного города. Красноярск: Изд-во Краснояр. гос. ун-та, 1998. 109 с.
19. *Якуш С.Е.* Гидродинамика и горение газовых и двухфазных выбросов в открытой атмосфере: дис. . . . д-ра физ.-мат. наук. М., 2000. 336 с.
20. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики / пер. с англ.; под ред. Г.П. Мотулевич. М.: Наука, 1973. 720 с.
21. *Ландсберг Г.С.* Оптика. М.: Наука, 1976. 928 с.
22. *Накамато К.* ИК-спектры и спектры КР неорганических и координационных соединений / пер. с англ.; под ред. Ю.А. Пентина. М.: Мир, 1991. 536 с.

## REFERENCES

- [1] Akhobadze G.N. Methods for air pollution control. *Ekol. Proizvod.* [Ecol. Prod.], 2010, no. 1, pp. 35–41 (in Russ.).
- [2] Molles M.C. Ecology: concepts and applications. New York, McGraw-Hill, 2008. 604 p.
- [3] Korolenko L.I., Sinitsyna O.R. Methods of measuring the concentration of pollutants in industrial emissions. *Ekol. Proizvod.* [Ecol. Prod.], 2011, no. 11, pp. 50–53 (in Russ.).
- [4] Borovlev A.E., Kungurtsev S.A. The hardware-software lidar complex as an element of the geoinformation analytical system of Belgorod. *Ekol. Prib. Sist.* [Ecol. Instrum. Syst.], 2008, no. 11, pp. 56–59 (in Russ.).
- [5] Fokin M.V., Bepalov M.S., Oseledets E.Yu., Uspenskaya T.M. Air quality control at the SPZ border. *Ekol. Proizvod.* [Ecol. Prod.], 2010, no. 4, pp. 50–52 (in Russ.).
- [6] Snyder A.P., Jensen J.O., Maswadeh W.M. AIRIS remote detection for chemical vapor clouds: System design and detection algorithm. *Lasers Electro Opt.*, 2007, pp. 1–2. doi: 10.1109/CLEO.2007.4453375.
- [7] Zuev V.E., Zuev V.V. *Sovremennyye problemy atmosfery optiki. T. 8. Distantionnoe opticheskoe zondirovanie atmosfery* [Modern problems of atmospheric optics. Vol. 8. Remote optical sensing of the atmosphere]. St. Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 1992. 232 p.
- [8] Bianchini G., Cortesi U., Palchetti L. Emission Fourier transform spectroscopy for the remote sensing of the atmosphere. *Opt. Lasers Eng.*, 2002, vol. 37, no. 2–3, pp. 187–202.
- [9] Zolotov Yu.A. *Problemy analiticheskoy khimii. T. 13. Vnelaboratornyy khimicheskiy analiz* [Problems of analytical chemistry. Vol. 13. Non-laboratory chemical analysis]. Moscow, Nauka, 2010. 504 p.
- [10] Glagolev K.V., Morozov A.N., Nazarenko B.P. Monitoring of the open atmosphere by the FTIR spectrometer. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2005, no. 3 (18), pp. 9–25 (in Russ.).
- [11] Shimoto A., Kobayashi H., Kadokura S. Radiometric calibration for the airborne interferometric monitor for greenhouse gases simulator. *Appl. Opt.*, 1999, vol. 38, pp. 571–576.
- [12] Beil A., Daum R., Matz G. Remote sensing of atmospheric pollutants by passive FTIR spectrometry. *Proc. SPIE*, 1998, vol. 3493, pp. 32–43.
- [13] Heland J., Schaffer K. Analysis of aircraft exhaust with Fourier-transform infrared emission spectroscopy. *Appl. Opt.*, 1997, vol. 36, pp. 4922–4931.
- [14] Morozov A.N., Svetlichnyy S.I. *Osnovy fur'e-spektroradiometrii* [Fundamentals of Fourier transform spectroradiometry]. Moscow, Nauka Publ., 2006. 275 p.
- [15] Hoffland L., Piffath R., Bouk J. Spectral signature of chemical agents and stimulants. *Opt. Eng.*, 1985, vol. 24, no. 6, pp. 982–984.
- [16] Kochikov I.V., Morozov A.N., Svetlichnyi S.I., Fufurin I.L. Substance recognition in the open atmosphere from a single Fourier transform spectroradiometer interferogram. *Opt. Spectrosc.*, 2009, vol. 106, no. 5, pp. 666–671. doi: 10.1134/S0030400X09050075.
- [17] Dvoruk S.K., Kornienko V.N., Kochikov I.V., Lel'kov M.V., Morozov A.N., Pozdnyakov V.A., Svetlichnyi S.I., Tabalin S.E. Processing of double-sided interferograms subject to background self-radiation of an FTIR spectrometer. *Opt. Spectrosc.*, 2002, vol. 93, no. 6, pp. 970–974. doi: 10.1134/1.1531725.

- [18] Zamay S.S., Yakubaylik O.E. Modeli otsenki i prognoza zagryazneniya atmosfery promyshlennymi vybrosami v informatsionno-analiticheskoy sisteme prirodookhrannykh sluzhb krupnogo goroda [Models for estimating and predicting the air pollution by industrial emissions in the information-analytical system of environmental protection services of big cities]. Krasnoyarsk, Krasnoyarsk Gos. Univ. Publ., 1998. 109 p.
- [19] Yakush S.E. Gidrodinamika i gorenie gazovykh i dvukhfaznykh vybrosov v otkrytoy atmosfere [Hydrodynamics and combustion of gas and two-phase outbursts in the open atmosphere]. Diss. dokt. fiz.-mat. nauk [Dr. phys.-math. sci. diss.]. Moscow, 2000. 336 p.
- [20] Born M., Wolf E. Principles of Optics. New York, McGraw-Hill, 1972, 703 p. (Russ. ed.: Born M., Vol'f E. Osnovy optiki. Moscow, Nauka Publ., 1973. 720 p.).
- [21] Landsberg G.S. Optika [Optics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 1976. 926 p.
- [22] Nakamoto K. Infrared and Raman spectra of inorganic and coordination compounds. New York, John Wiley, 1986. 484 p. (Russ. ed.: Nakamoto K. IR-spektry i spektry KR neorganicheskikh i koordinatsionnykh soedineniy. Moscow, Mir Publ., 1991. 536 p.).

Статья поступила в редакцию 02.07.2013

Роман Николаевич Садовников — д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник ФГКУ “33ЦНИИИ” Минобороны России. Автор около 53 научных работ в области спектроскопии, оптической локации и прецизионных измерений.

33 Центральный научно-исследовательский испытательный институт, Российская Федерация, 412918, Вольск-18, Саратовская обл., ул. Краснознаменная, д. 1.

R.N. Sadovnikov — Dr. Sci. (Eng.), professor, chief researcher of the 33rd Central Research Test Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation. Author of about 53 publications in the field of spectroscopy, optical radar and precision measuring.

The 33rd Central Research Test Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation, ul. Krasnoznamennaya, 1, Volsk-18, Saratov region, 412918 Russian Federation.

Андрей Юрьевич Бойко — канд. техн. наук, доцент, заместитель начальника ФГКУ “33ЦНИИИ” Минобороны России. Автор более 40 научных работ в области спектроскопии, оптической локации и прецизионных измерений.

33 Центральный научно-исследовательский испытательный институт, Российская Федерация, 412918, Вольск-18, Саратовская обл., ул. Краснознаменная, д. 1.

A.Yu. Boiko — Cand. Sci. (Eng.), assoc. professor, deputy head of the 33rd Central Research Test Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation. Author of more than 40 publications in the field of spectroscopy, optical radar and precision measuring.

The 33rd Central Research Test Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation, ul. Krasnoznamennaya, 1, Volsk-18, Saratov region, 412918 Russian Federation.

Петр Евгеньевич Шлыгин — канд. техн. наук, старший научный сотрудник ФГКУ “33ЦНИИИ” Минобороны России. Автор более 15 научных работ в области спектроскопии, оптической локации и прецизионных измерений.

33 Центральный научно-исследовательский испытательный институт, Российская Федерация, 412918, Вольск-18, Саратовская обл., ул. Краснознаменная, д. 1.

P.E. Shlygin — Cand. Sci. (Eng.), senior researcher of the 33rd Central Research Test Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation. Author of more than 15 publications in the field of spectroscopy, optical radar and precision measuring.

The 33rd Central Research Test Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation, ul. Krasnoznamennaya, 1, Volsk-18, Saratov region, 412918 Russian Federation.