

В.А. Донченко, М.В. Кабанов, Ю.И. Кулаков, В.П. Петров

ВЛИЯНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ НА КОЭФФИЦИЕНТЫ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ДЫМАХ, НАХОДЯЩИХСЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Экспериментально исследованы изменения коэффициентов обратного рассеяния оптического излучения малыми частицами древесного дыма в зависимости от относительной влажности воздуха при воздействии внешнего электрического поля. Показано, что при исследовании процессов рассеяния оптической радиации в атмосфере с учетом изменения относительной влажности необходимо учитывать влияние электрических полей, когда преобладающим процессом в укрупнении аэрозольных частиц является электрокоагуляция.

Относительная влажность воздуха выступает одним из наиболее важных метеорологических факторов, определяющих процессы изменения структурных, оптических и электрических свойств атмосферного аэрозоля. Известно, что атмосферный аэрозоль представляет собой сложные конгломераты различных химических соединений и при взаимодействии мелких частиц с водяным паром в атмосфере наблюдаются в основном два процесса [1]: укрупнение частиц с ростом относительной влажности и регулярное изменение результирующего показателя преломления: $n(\lambda) \rightarrow n_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda)$ при $\eta \rightarrow 100\%$. Указанные процессы приводят к взаимно противоположным изменениям радиационных характеристик аэрозоля и в первую очередь локационного рассеяния. В зависимости от того, какой из процессов будет преобладать при изменении влажности, можно ожидать как уменьшения, так и увеличения значений коэффициентов обратного рассеяния.

К этому следует добавить, что поскольку атмосферный аэрозоль представляет собой заряженные частицы, взаимодействующие в электрическом поле Земли и в поле влажности, то при исследовании процессов рассеяния оптической радиации необходимо учитывать и влияние электрических характеристик. Установлено, что с увеличением влажности в атмосфере происходит изменение спектра ионов по подвижности, что ведет к изменению электропроводности воздуха. При этом увеличивается поглощение ионов аэрозольными частицами и происходит их интенсивная зарядка [2, 3]. Наличие же электрического поля атмосферы способствует процессам коагуляции, слипанию и укрупнению частиц, что приводит к изменению спектра размеров частиц, их формы, агрегатного состояния, коэффициента преломления, ориентации и т.п. [4–6], вследствие чего изменяются как электрические, так и оптические характеристики аэрозоля.

Таким образом, при решении задач атмосферной оптики возникает необходимость учитывать и градиент поля влажности, и вариации электрического поля.

В данной статье представлены результаты исследования изменения коэффициентов обратного рассеяния оптического излучения на длине волны $\lambda = 1,06$ мкм малыми частицами древесного дыма (параметр Ми $\rho = 4 \pm 3$) в зависимости от относительной влажности воздуха при воздействии внешнего электрического поля, поскольку дымы, образующиеся в результате естественных и искусственных процессов горения, являются составной частью атмосферного аэрозоля и играют большую роль в загрязнении атмосферы и формировании ее оптических свойств. Дымовой аэрозоль представляет собой мелкие частицы со средним радиусом $r < 1$ мкм.

Измерения проводились в камере искусственных сред объемом $3,5 \times 3,5 \times 10^3$ м³. Значения относительной влажности в камере измерялись аспирационным психрометром с относительной погрешностью 1,5–2%. Повышенные значения влажности в интервале 70–90% достигались предварительным увлажнением камеры туманом парения. Электрическое поле создавалось наложением регулируемого постоянного напряжения на горизонтальные пластины из листового алюминия размером 1×10 м², расположенные вдоль аэрозольной камеры. Расстояние между пластинами составляло 1 м. Разность потенциалов на пластинах могла изменяться от нуля до $5 \cdot 10^4$ В. Оптическая схема установки с небольшими изменениями описана в [7]. Выбранные условия эксперимента характеризовались следующими параметрами: оптическая ось приемника пересекалась с осью пучка излучения под углом 3° на расстоянии $l = 4$ м от передней стенки камеры; диаметр пучка $d = 0,5$ см; расходимость $\theta = 0,001$ рад; диаметр приемного объектива $D = 20$ см; угол поля зрения $\psi = 0,01$ рад; минимальное расстояние до рассеивающего объема $l_0 = 2$ м; геометрическая толщина рассеивающего слоя $L = 6,4$ м; база $r = 22$ см.

Поток отраженного от рассеивающей среды излучения для выбранной схемы расположения приемника и источника в приближении однократного рассеяния определяется выражением [8]

$$F = K \frac{\alpha F_0}{\pi \Psi^2} f(\pi) \int_{l_0}^L \frac{l^{-2\alpha l}}{l} \Omega(l) G(l) dl, \quad (1)$$

где телесный угол $\Omega(l) = \pi \psi^2 / 4$ при $l \leq D/\psi$; F_0 – падающий на среду поток излучения; K – коэффициент пропускания приемной оптики; $f(\pi)$ – значения индикатрисы рассеяния в направлении 180° ; α_p и α – коэффициенты рассеяния и ослабления среды в случае отсутствия поглощения $\alpha_p = \alpha$; $G(l)$ – общая площадь, образуемая конусами излучения и визирования в плоскости, перпендикулярной к оси приемника, при $l_0 \leq l \leq L$ и малом диаметре пучка излучения $G(l) = \pi \psi^2 l^2$.

После подстановки в выражение (1) исходных параметров и проведя интегрирование, получаем исходное выражение

$$F = K \frac{F_0 \pi \Psi^2}{8} \frac{\beta_\pi}{\alpha} [e^{-2\alpha l_0} - e^{-2\alpha L}], \quad (2)$$

где β_π – коэффициент обратного рассеяния.

Как видно из полученного выражения, измеряя в эксперименте коэффициент ослабления среды и значение потока отраженного излучения, отнесенного к исходному потоку излучения источника F/F_0 , можно определить коэффициент обратного рассеяния β_π .

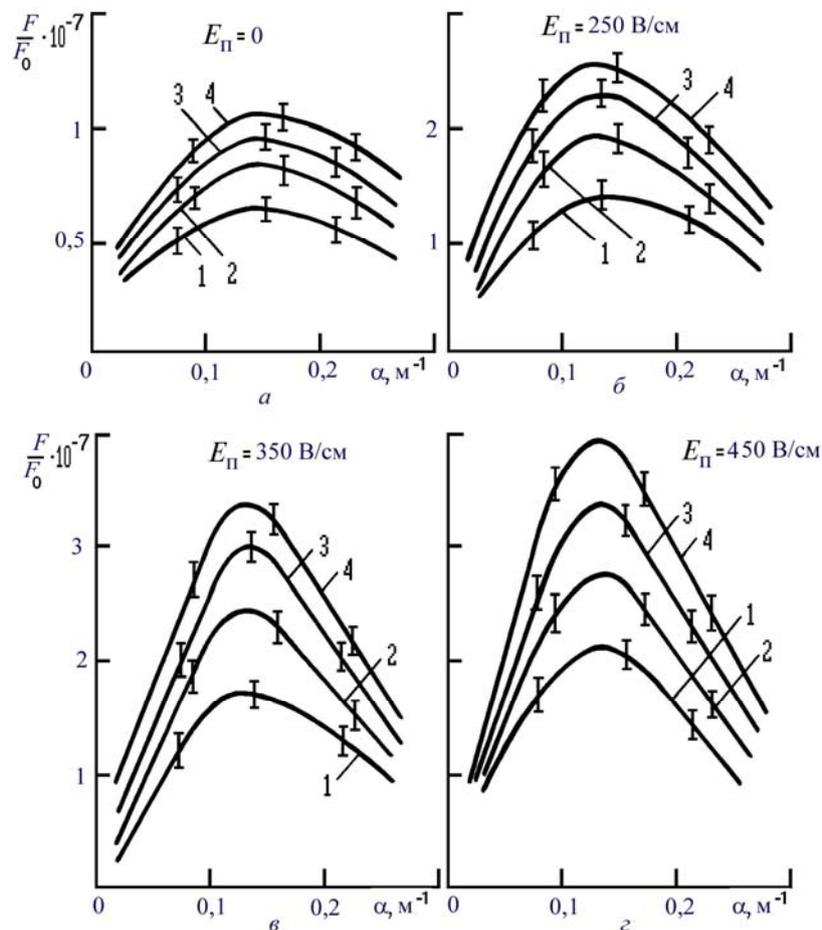


Рис. 1. Изменение нормированного потока обратнорассеянного излучения от коэффициента ослабления α при различных значениях E_π с изменением относительной влажности: 1 – $\eta = 30$; 2 – 56; 3 – 76; 4 – 90%

На рис. 1 представлено изменение сигналов отраженного излучения, нормированных к сигналу источника в зависимости от ослабления рассеивающей среды при различных значениях напряженности электрического поля и изменения относительной влажности η от 30 до 90%.

Кривые получены путем усреднения данных по пяти реализациям. Доверительный интервал (вертикальные отрезки) показывает среднее квадратическое отклонение. Средняя ошибка измерений не превышает 2%.

Характерный ход кривых на рисунке определяется динамикой осаждения дымового аэрозоля и строго описывается выражением (2) в приближении однократного рассеяния. В начальный период обратнорассеянный сигнал обусловлен ослаблением до рассеивающего объема. По мере осаждения дыма отраженный сигнал увеличивается, достигая максимума при $\alpha = 0,13 \text{ м}^{-1}$, а затем падает за счет уменьшения концентрации аэрозольных частиц в объеме.

При отсутствии внешнего электрического поля (рис. 1), при изменении относительной влажности воздуха от 30 до 90% наблюдается увеличение обратнорассеянного сигнала. Это объясняется тем, что с увеличением влажности за счет капиллярных сил сцепления между частицами увеличивается процесс коагуляции, что ведет к укрупнению частиц дыма. Кроме того, дымовой аэрозоль является сам по себе заряженным, благодаря процессу образования, и увеличение влажности воздушной среды сопровождается различными явлениями в среде и на поверхности аэрозольных частиц (ориентированная адсорбция молекул воды на поверхности частиц, зарядка и перезарядка частиц, поляризация зарядов на частицах и т.д.).

Вследствие этих процессов происходит возникновение индуцированных зарядов на увлажненных частицах, что приводит их к дипольному зарядению и увеличивает вероятность слипания. Этот эффект особенно существен для частиц с размерами порядка десятых и сотых долей микрометра [4]. Наличие внешнего электрического поля, которое является одновременно источником ионизации среды в камере за счет коронных разрядов с краев обкладок конденсатора, приводит к интенсивной перезарядке аэрозольных частиц путем осаждения аэроионов на поверхности и к дополнительному дрейфу заряженных частиц под действием электрических сил самого поля. Эти процессы усиливают коагуляцию, что ведет к интенсивному укрупнению частиц [6] и к увеличению отраженного сигнала (рис. 1, б, в, г). Причем с увеличением влажности и величины напряженности электрического поля максимум обратнорассеянного сигнала резко возрастает.

На рис. 2 представлено изменение проводимости среды в логарифмическом масштабе в зависимости от напряженности электрического поля и относительной влажности в чистой камере. Проводимость среды измерялась по току проводимости в конденсаторе:

$$\sigma = I / (SE),$$

где I — ток в конденсаторе; S — площадь пластины; E_n — напряженность поля.

Как видно из рисунка, проводимость воздушной среды в камере с увеличением электрического поля и относительной влажности растет, причем изменения составляют два порядка. Так, при изменении напряженности поля от 150 до 450 В/см значения проводимости изменяются от $1,8 \cdot 10^{-17} \dots 1,6 \cdot 10^{-16}$ до $1,2 \cdot 10^{-16} \dots 1,2 \cdot 10^{-14} \text{ См} \cdot \text{см}^{-1}$ при изменении влажности от 30 до 90% соответственно. Это говорит о том, что с увеличением напряженности электрического поля увеличивается количество аэроионов, а увеличение относительной влажности воздуха в камере усиливает поглощение аэроионов водяным паром, что и приводит к росту проводимости. Тот же процесс наблюдается и в случае присутствия в камере дымового аэрозоля. На рис. 3 показано изменение проводимости дымового аэрозоля от влажности при изменении напряженности электрического поля. Из рисунка видно, что оба фактора (напряженность поля и влажность) способствуют интенсивной зарядке частиц аэрозоля, что и приводит к увеличению проводимости аэрозольной среды. Увеличение электростатического заряда на аэрозольных частицах, взаимодействующих во внешнем электрическом поле, всегда способствует увеличению скорости коагуляции [3, 4], что ведет к укрупнению конгломератов дымового аэрозоля.

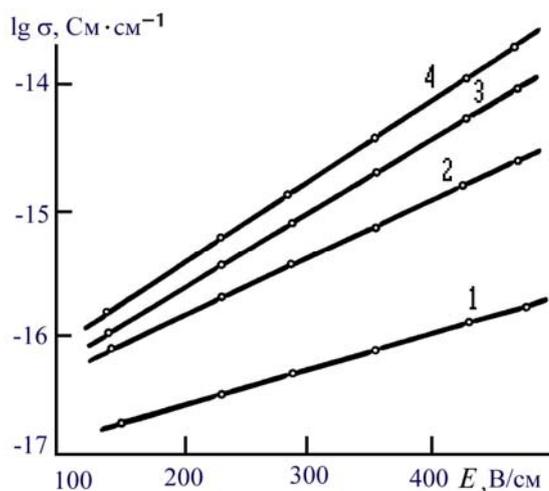


Рис. 2. Изменение электропроводности среды от напряженности электрического поля при изменении влажности в чистой камере: 1 — $\eta = 30$; 2 — 56; 3 — 76; 4 — 90%

На рис. 4 представлена зависимость коэффициентов обратного рассеяния оптического излучения от влажности при изменении напряженности электрического поля. Значения коэффициентов обратного рассеяния вычислены для среды с коэффициентом ослабления $\alpha = 0,13 \text{ м}^{-1}$. Из рисунка видно, что с увеличением влажности при отсутствии внешнего электрического поля коэффициент обратного рассеяния начинает медленно увеличиваться с $\eta > 60\%$. При включении внешнего электрического поля коэффициент обратного рассеяния с увеличением влажности возрастает с большей скоростью, изменяясь при этом в 2–4 раза (в диапазоне $E_n = 250 \dots 450 \text{ В/см}$). Такое изменение коэффициента обратного рассеяния оптического излучения обусловлено, исходя из вышеприведенных рассуждений, только коагуляционными процессами, происходящими в дымовом аэрозоле.

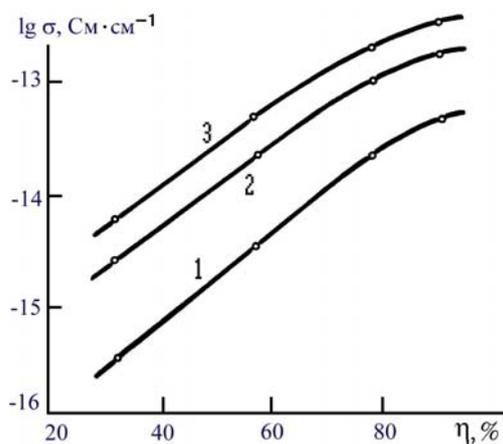


Рис. 3. Изменение электрической проводимости дымового аэрозоля от влажности при различных напряженностях электрического поля: 1— $E_n = 260$; 2—360; 3—450 В/см

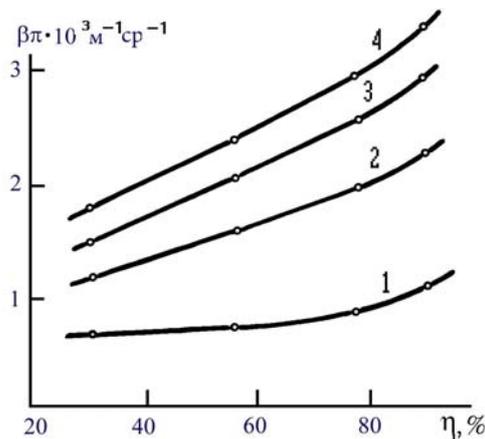


Рис. 4. Зависимость коэффициента обратного рассеяния от влажности при разных напряженностях электрического поля: 1— $E_n = 0$; 2—250; 3—350; 4—450 В/см

Необходимо отметить ряд работ [9–11], в которых исследовалось влияние относительной влажности воздуха на лидарное отношение в аэрозольной среде выхлопа дизельного топлива, при зондировании естественного атмосферного аэрозоля, и на форму угловых характеристик рассеяния света древесным дымом, где показано, что в изменении оптических характеристик основную роль играет зависимость показателя преломления аэрозольных частиц от изменения относительной влажности, приводящая к противоположному результату. Это объясняется спецификой исследуемого аэрозоля и его образованием.

Таким образом, показано, что при исследовании процессов рассеяния оптической радиации в атмосфере с учетом изменения относительной влажности необходимо учитывать влияние электрических полей, когда преобладающим процессом в укрупнении аэрозольных частиц является электрокоагуляция. Особенно это может проявиться при грозовых ситуациях.

1. Розенберг Г. В., Горчаков Г. И. и др. // Физика атмосферы и проблемы климата. М.: Наука, 1980. С. 216–257.
2. Смирнов В. В. // Труды ИЭМ Госкомгидромета. Вопросы атмосферного электричества. 1983. Вып. 30 (104). С. 64–106.
3. Грин Х., Лейн В. // Аэрозоли — пыли, дымы и туманы. Л.: Химия, 1982. 427 с.
4. Ивлев Л. С. Химический состав и структура атмосферных аэрозолей. Л.: Изд-во ЛГУ. 1982. 365 с.
5. Смирнов В. И. // Труды ЦАО. 1969. Вып. 92. С. 82–106.
6. Генин Е. В., Донченко В. А., Кабанов М. В., Кулаков Ю. И. и др. // Изв. вузов СССР. Физика. 1986. № 2. С. 82–87.
7. Донченко В. А., Кулаков Ю. И., Терентьев В. В. // Исследования по электродинамике и распространению электромагнитных волн. Томск: Изд-во ТГУ, 1977. С. 180–184.
8. Зуев В. Е., Кабанов М. В. // Перенос оптических сигналов в земной атмосфере. М.: Советское радио, 1977. 210 с.
9. Кауль Б. В., Краснов О. А. // Проблемы дистанционного зондирования атмосферы. Томск: ИОА СО АН СССР, 1976. С. 98–104.
10. Балин Ю. С., Креков Г. М., Самохвалов И. В., Рахимов Р. Ф. // Метеорология и гидрология. 1978. № 8. С. 114–119.
11. Козлов В. С., Фадеев В. Я. // V Всес. симпозиум по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Томск: ИОА СО АН СССР, 1978. С. 139–142.

V. A. Donchenko, M. V. Kabanov, Yu. I. Kulakov, V. P. Petrov. **Influence of Relative Humidity of the Backscatter of Optical Radiation by Smokes in Electric Field.**

This paper deals with the experimental investigation of optical wave backscatter by small particles of wood smoke affected by an electric field under the conditions of varying relative humidity of air. It is shown that in experiments on studying light scattering in the atmosphere with the account for variations of the relative humidity one should also take into account the influence of electric fields, especially when electrocoagulation process is dominating in the particles growth.