

Ю.А. Пхалагов, В.Н. Ужegov, Е.В. Овчаренко, В.Н. Генин, В.А. Донченко, М.В. Кабанов, Н.Н. Щелканов

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СВЯЗЕЙ АЭРОЗОЛЬНОГО ОСЛАБЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С НАПРЯЖЕННОСТЬЮ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск

Поступила в редакцию 2.10.98 г.

Принята к печати 15.12.98 г.

Рассматриваются результаты синхронных натурных измерений коэффициентов аэрозольного ослабления в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн $\alpha(\lambda)$ и напряженности атмосферного электрического поля E . Анализируются статистические связи между $\alpha(\lambda)$ в разных участках спектра и E в условиях атмосферных дымок. Показано, что в общем случае в реальных атмосферных дымках связь между этими параметрами невелика. Выявлено, что максимальные нормированные коэффициенты корреляции ($\sim 0,5$) наблюдаются в видимой области спектра и в условиях повышенной относительной влажности воздуха. Это позволяет заключить, что на величину напряженности электрического поля в дымках в основном влияют мелкодисперсные, увлажненные частицы, на которые эффективней идет сток легких ионов воздуха.

Известно, что электрическое поле атмосферы, формируемое грозвыми облаками, существует постоянно и характеризуется широким спектром естественных вариаций, обусловленных различными факторами (см. [1, 2] и ссылки, указанные в них). В условиях атмосферных дымок (при отсутствии осадков и туманов) важным фактором изменчивости напряженности атмосферного электрического поля E является изменение концентрации ионизированных молекул воздуха (легких ионов) вследствие их стока на атмосферный аэрозоль. Заметим, что ионизация молекул воздуха происходит в основном за счет естественной радиоактивности и космического излучения. Уменьшение концентрации легких ионов при их стоке на частицы аэрозоля приводит к уменьшению электрической проводимости воздуха (γ) и, соответственно, к росту напряженности электрического поля.

В фундаментальной обзорной статье И.М. Имянитова и К.С. Шифрина, посвященной проблемам атмосферного электричества [1], впервые было высказано предположение о существовании детерминированной связи между напряженностью атмосферного электрического поля и метеорологической дальностью видимости (S_m):

$$E = C S_m^{-1}, \quad (1)$$

где C – некоторая константа.

Выражение (1) получено из общих соображений в предположении, что $E \sim \gamma^{-1}$, а $\gamma \sim N^{-1}$ (N – концентрация нейтральных частиц в приземном слое воздуха). Тогда напряженность поля должна быть пропорциональна числу частиц, т.е. $E \sim N$. Учитывая, что $S_m \sim N^{-1}$, приходим к выражению (1).

Используя известное соотношение $S_m = 3,91 \alpha(0,55)^{-1}$, где $\alpha(0,55)$ – коэффициент аэрозольного ослабления излучения на длине волны $\lambda = 0,55$ мкм, напряженность атмосферного электрического поля можно представить также в виде

$$E = C_1 \alpha(0,55). \quad (2)$$

Выражения (1) и (2), связывающие электрические и оптические характеристики атмосферы, получены в предположении, что вариации параметров S_m и $\alpha(0,55)$ обусловлены только изменением концентрации частиц. На самом же деле указанные параметры зависят не только от числа частиц, но и от их размеров и вещественного состава, которые в зависимости от метеорологических условий могут значительно изменяться.

Цель данной работы заключается в выяснении того, как же в действительности в условиях реальных атмосферных дымок связаны между собой эти параметры и какова роль частиц разных размеров в механизме стока легких ионов на аэрозоль. Естественно, что для решения этих вопросов необходимы специальные исследования по изучению статистических связей между вариациями напряженности атмосферного электрического поля в различных погодных условиях и коэффициентов аэрозольного ослабления в широком диапазоне длин волн.

В связи с этим в августе–сентябре 1997 г. в районе г. Томска был проведен двадцатидневный цикл круглосуточных синхронных измерений спектрального пропускания приземной атмосферы $T(\lambda)$ в диапазоне длин волн $\lambda = 0,44 \div 12,2$ мкм на приземной трассе длиной около 800 м, напряженности атмосферного электрического поля E , относительной влажности воздуха RH и температуры воздуха t . Все измерения осуществлялись с периодичностью 6 циклов в сутки. Напряженность электрического поля измерялась с помощью струнного динамического датчика [3]. Спектральные измерения $T(\lambda)$ проводились на автоматизированном фильтровом двухканальном комплексе [4]. По полученным значениям $T(\lambda)$ находились коэффициенты общего ослабления излучения $\epsilon(\lambda)$, из которых с помощью аппарата множественной линейной регрессии [5] рассчитывались коэффициенты аэрозольного ослабления $\alpha(\lambda)$ для всего диапазона длин волн. Заметим, что измерения $T(\lambda)$ в указанном спектральном интервале позволяют через оптические характеристики оценить вклад в ослабление различных по размеру частиц (от субмикронных до грубодисперсных).

Всего за период измерений был получен массив данных, насчитывающий 91 реализацию оптических, метеорологических и электрических параметров атмосферы. При этом диапазон изменчивости по $\alpha(0,55)$ составлял $0,07 \div 0,35 \text{ км}^{-1}$ (что соответствует изменению метеорологической дальности видимости S_m от 55 до 11 км), по температуре воздуха $0,1 \div 19 \text{ }^\circ\text{C}$, по относительной влажности $33 \div 95\%$ и по напряженности электрического поля $8 \div 132 \text{ В/м}$. Средние значения этих параметров, их среднеквадратические отклонения (СКО) и нормированные коэффициенты взаимной корреляции в период измерений приведены в табл. 1. Здесь следует отметить, что в данном массиве наблюдается значимая положительная корреляция напряженности электрического поля с коэффициентом $\alpha(0,55)$, характеризующим замутненность атмосферы, и с относительной влажностью воздуха. Близость вариаций этих трех параметров наглядно проявляется и в их суточном ходе, показанном на рис. 1. Анализ этих данных позволяет заключить, что в атмосферных дымках, в отсутствие осадков и туманов, между замутненностью воздуха и напряженностью электрического поля имеется статистическая взаимосвязь, состоящая в том, что с увеличением плотности дымки во влажной атмосфере напряженность поля возрастает. Последнее обстоятельство, связанное с влажностью воздуха, может оказаться весьма существенным для физической интерпретации влияния атмосферного аэрозоля на напряженность электрического поля.

Известно, что суточные вариации влажности воздуха в основном влияют на степень увлажнения и, соответственно, на размер аэрозольных частиц, а не на их концентрацию [6,7]. Поэтому возможно, что именно увлажненность частиц является решающим фактором, определяющим эффективность стока легких ионов на аэрозоль и влияющим на изменение напряженности поля. Учитывая, что в континентальных дымках субмикронный аэрозоль по сравнению с грубодисперсным является более гигроскопичным, можно предполагать, что сток легких ионов в основном должен идти на субмикронный аэрозоль.

Для проверки этого предположения проанализируем взаимную динамику изменения коэффициентов $\alpha(\lambda)$ на разных длинах волн и напряженности поля E в дымках разной плотности. Для проведения такого анализа общий массив данных был разбит на три подмассива по степени замутнения атмосферы, в качестве оценки которого был взят коэффициент ослабления излучения в области длины волны $0,56 \text{ мкм}$. В первый подмассив вошли спектры, полученные при $\alpha(0,56) < 0,11 \text{ км}^{-1}$, во второй – при $\alpha(0,56) = 0,11 \div 0,2 \text{ км}^{-1}$ и в третий – при $\alpha(0,56) > 0,2 \text{ км}^{-1}$. Средние значения и СКО для параметров $\alpha(0,56)$, RH , t и E для каждого подмассива приведены в табл. 2. Видно, что увеличение замутнения воздуха, которое происходит с ростом относительной влажности воздуха, приводит к значительному возрастанию средней напряженности атмосферного электрического поля. При этом темп роста $\alpha(0,56)$ и E резко увеличивается при влажностях больше 70%.

Таблица 1

Средние значения, СКО и нормированные коэффициенты взаимной корреляции параметров: $\alpha(0,56)$, RH , t и E для общего массива данных. Уровень значимой корреляции $\sim 0,20$

Измеряемый параметр	Среднее значение	СКО	Коэффициенты взаимной корреляции			
			$\alpha(0,56)$	RH	t	E
$\alpha(0,56), \text{ км}^{-1}$	0,141	0,053	1,00	–	–	–
$RH, \%$	69,97	18,43	0,41	1,00	–	–
$t, \text{ }^\circ\text{C}$	9,55	3,42	-0,016	-0,710	1,00	–
$E, \text{ В/м}$	76,13	34,01	0,50	0,727	-0,38	1,00

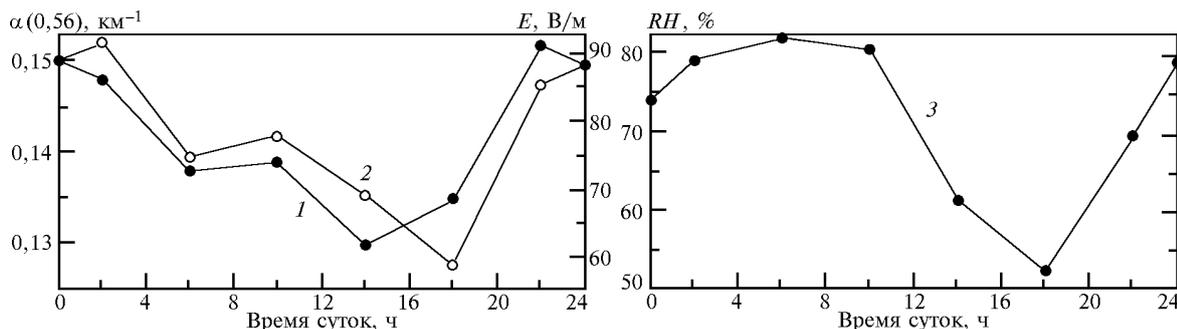


Рис. 1. Усредненный суточный ход коэффициента ослабления $\alpha(0,56)$ (кривая 1), напряженности атмосферного электрического поля E (2) и относительной влажности воздуха RH (3) в период измерений

Таблица 2

Средние значения и СКО параметров $\alpha(0,56)$, RH , t и E , соответствующие усредненным спектрам коэффициентов аэрозольного ослабления рис. 2 (N – количество реализаций)

№ кривой на рис. 2	$\overline{\alpha(0,56)}, \text{ км}^{-1}$	$\overline{RH}, \%$	$\sigma_{RH}, \%$	$\overline{t}, \text{ }^\circ\text{C}$	$\sigma_t, \text{ }^\circ\text{C}$	$\overline{E}, \text{ В/м}$	$\sigma_E, \text{ В/м}$	N
1	0,103	63,6	15,9	8,36	2,82	55,0	21,9	18
2	0,153	69,1	18,1	9,87	3,64	76,8	33,6	64
3	0,302	91,3	7,8	4,41	1,93	117,3	5,3	9

Усредненные спектральные зависимости коэффициентов аэрозольного ослабления, соответствующие этим подмассивам, приведены на рис. 2. Видно, что наиболее значительные изменения коэффициентов $\alpha(\lambda)$ происходят в диапазоне длин волн 0,44–2,0 мкм, где основной вклад в аэрозольное ослабление вносят частицы субмикронного диапазона, а в области 8–12 мкм, где главный вклад дает грубодисперсный аэрозоль, они существенно меньше. Сопоставление амплитуды изменения коэффициентов $\alpha(\lambda)$ на разных длинах волн и напряженности поля в дымках разной плотности подтверждает предположение о преобладающей роли субмикронных частиц в процессе стока легких ионов на атмосферный аэрозоль.

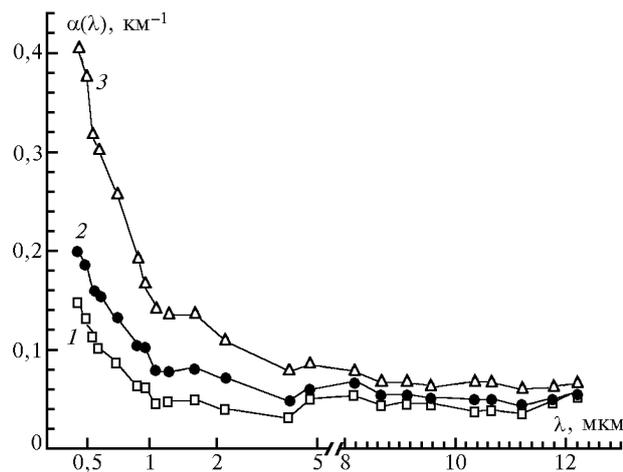


Рис. 2. Трансформация спектральной структуры коэффициентов аэрозольного ослабления $\alpha(\lambda)$ в атмосферных дымках разной плотности (значения параметров $\overline{\alpha(0,56)}$, \overline{RH} , \overline{t} и \overline{E} для кривых 1, 2, 3 даны в табл. 2)

Для количественной оценки роли аэрозольных частиц разных размеров в их взаимодействии с электрическим полем рассмотрим данные табл. 3, где приведены средние значения коэффициентов $\alpha(\lambda)$ в диапазоне λ от 0,44 до 12 мкм, их среднеквадратические отклонения $\sigma_{\alpha(\lambda)}$ и нормированные коэффициенты взаимной корреляции между $\alpha(\lambda)$ и параметрами RH , t и E для общего массива данных.

Как видно, коэффициенты $\alpha(\lambda)$ имеют значимую положительную корреляцию с напряженностью электрического поля в области спектра $\lambda = 0,44\text{--}3,97$ мкм. Интересно, что именно в этом спектральном диапазоне отмечается положительная корреляция коэффициентов $\alpha(\lambda)$ с влажностью воздуха. Там же, где она становится отрицательной (в области $\lambda > 4$ мкм), корреляционная связь между $\alpha(\lambda)$ и E разрушается. Эти данные в целом также подтверждают предположение о преобладающем влиянии мелких частиц на напряженность атмосферного электрического поля.

Существование отрицательной корреляции $\alpha(\lambda)$ с относительной влажностью воздуха в области $\lambda > 4$ мкм наблюдается не часто и в данном случае это, вероятно, связано с особенностью суточного хода концентрации грубодисперсного аэрозоля, которая убывает в ночные и утренние часы вследствие ослабления восходящих потоков, в то время как влажность воздуха в этот период растет. В дневные же часы с ростом температуры воздуха влажность уменьшается, а концентрация крупных частиц в приземном слое уве-

личивается за счет усиления восходящих потоков, обусловленных турбулентной диффузией.

Подобные механизмы выноса аэрозоля, по-видимому, определяют и характер спектральной структуры коэффициентов корреляции между $\alpha(\lambda)$ и температурой воздуха. Так, очень слабая отрицательная корреляция этих параметров в видимой области, возможно, связана с дневным выносом в более высокие слои атмосферы мелкодисперсного аэрозоля, концентрация которого не успевает восстановиться за счет фотохимических процессов. Значимая положительная корреляция между $\alpha(\lambda)$ и t в области $\lambda > 4$ мкм, скорее всего, обусловлена дневным выносом почвенного грубодисперсного аэрозоля в приземный слой атмосферы. Здесь важно отметить, что при этом корреляция между $\alpha(\lambda)$ в указанном диапазоне длин волн и напряженностью поля остается ниже уровня значимости, т.е. изменение концентрации грубодисперсного аэрозоля в атмосферных дымках слабо влияет на напряженность электрического поля. Последнее, очевидно, связано с низкой концентрацией крупных частиц в атмосфере.

Таблица 3

Средние значения коэффициентов $\alpha(\lambda)$, их СКО $\sigma_{\alpha(\lambda)}$ и нормированные коэффициенты взаимной корреляции между $\alpha(\lambda)$ и параметрами RH , t и E в осенних дымках Западной Сибири. Общий массив

λ , мкм	$\overline{\alpha(\lambda)}$, км ⁻¹	$\sigma_{\alpha(\lambda)}$, км ⁻¹	$\rho_{\alpha(\lambda),RH}$	$\rho_{\alpha(\lambda),t}$	$\rho_{\alpha(\lambda),E}$
0,44	0,2087	0,0770	0,461	-0,118	0,511
0,48	0,1933	0,0719	0,459	-0,098	0,511
0,52	0,1639	0,0612	0,423	-0,051	0,502
0,56	0,1406	0,0526	0,413	-0,016	0,498
0,69	0,1353	0,0506	0,406	-0,003	0,495
0,87	0,1066	0,0403	0,327	0,125	0,471
1,06	0,0801	0,0320	0,222	0,203	0,423
1,22	0,0789	0,0315	0,149	0,205	0,342
1,60	0,0816	0,0325	0,160	0,196	0,337
2,17	0,0700	0,0284	0,165	0,233	0,381
3,97	0,0503	0,0221	0,079	0,232	0,308
4,69	0,0623	0,0258	-0,158	0,315	0,112
8,18	0,0682	0,0276	-0,277	0,496	0,056
8,66	0,0564	0,0241	-0,267	0,435	0,048
9,12	0,0569	0,0242	-0,259	0,405	0,056
9,55	0,0550	0,0235	-0,337	0,436	-0,017
10,34	0,0522	0,0228	-0,198	0,417	0,096
10,66	0,0518	0,0226	-0,193	0,444	0,141
11,21	0,0459	0,0206	-0,197	0,337	0,121
11,76	0,0549	0,0234	-0,378	0,422	-0,071
12,19	0,0606	0,0247	-0,448	0,405	-0,137

В целом полученные экспериментальные данные показывают, что даже в видимом диапазоне длин волн коэффициент корреляции между вариациями аэрозольного ослабления и напряженности электрического поля оказывается сравнительно небольшим ($\rho_{\alpha(\lambda),E} \sim 0,5$). Это означает, что в общем случае в реальных атмосферных дымках однозначной связи между этими параметрами не существует. Однако влияние атмосферного аэрозоля на напряженность электрического поля, несомненно, имеет место. Причем это влияние заметней проявляется в условиях плотных дымок при повышенной относительной влажности воздуха.

В заключение заметим, что для использования датчиков напряженности электрического поля в качестве индикатора

техногенной нагрузки для решения проблем экологического мониторинга (предлагаемого, в частности, в [8]) необходимо продолжать начатые работы с целью уточнения существующих моделей связи оптических и электрических параметров атмосферы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант N 97-05-65994).

1. *Имянитов И.М., Шифрин К.С.* // УФН. 1962. Т. LXXVI. Вып. 4. С. 593–642.
2. *Имянитов И.М., Колоколов В.П.* // Труды I Всес. симп. по атмосферному электричеству. Л.: Гидрометеиздат, 1976. С. 5–22.

3. *Донченко В.А., Кабанов М.В., Калайда В.Т., Кулаков Ю.И., Овчаренко Е.В.* // Изв. вузов. Физика. 1998. (в печати).
4. *Пхалагов Ю.А., Ужегов В.Н., Щелканов Н.Н.* // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. N 6. С. 667–671.
5. *Пхалагов Ю.А., Ужегов В.Н.* // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. N 10. С. 3–11.
6. *Горчаков Г.И., Емиленко А.С., Свириденков М.А.* // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1981. Т. 17. N 1. С. 39–49.
7. *Кабанов М.В., Панченко М.В., Пхалагов Ю.А. и др.* Оптические свойства прибрежных атмосферных дымок. Новосибирск: Наука, 1988. 201 с.
8. *Кобец В.П.* Естественные и антропогенные вариации электрического поля атмосферы: Автореф. дис. ...канд. физ.-мат. наук. Братск: индустр. инст., 1998. 24 с.

Yu.A. Pkhalagov, V.N. Uzhegov, E.V. Ovcharenko, V.N. Genin, V.A. Donchenko, M.V. Kabanov, N.N. Shehelkanov. **Correlation Between Aerosol Attenuation of Optical Radiation and Intensity of Atmospheric Electric Field.**

Simultaneous field measurements of aerosol attenuation coefficients $\alpha(\lambda)$ in the visible and IR-spectral ranges and the intensity of the atmospheric electric field E are treated in the paper. Statistic correlations between $\alpha(\lambda)$ and E magnitudes under condition of atmospheric haze are analyzed. It is shown, that the correlation between these parameters in the realistic atmospheric hazes is insignificant. The maximum normalized correlation coefficients (~ 0.5) are found to be observable within the visible spectral range and under conditions of increased relative humidity of the air. It allows an inference, that the microdispersion humidified particles, on which the light ions of the air are efficiently settled, mainly influence the electric field intensity in the hazes.