

Ю.А. Пхалагов, В.Н. Ужегов, И.И. Ипполитов¹, М.В. Винарский¹

Исследования взаимосвязей оптических и электрических характеристик приземной атмосферы

Институт оптики атмосферы СО РАН,

¹ *Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск*

Поступила в редакцию 27.12.2004 г.

Рассматриваются результаты одновременных исследований изменчивости коэффициентов аэрозольного ослабления оптического излучения, напряженности атмосферного электрического поля и УФ-потока (в диапазоне 280–320 нм) в июне 2004 г. в районе г. Томска. Обсуждается обнаруженный эффект противофазной динамики изменения коэффициента аэрозольного ослабления излучения на длине волны 0,45 мкм и напряженности электрического поля, наблюдавшийся в течение 10 дней. Показано, что этот эффект по времени четко совпадает с минимумом числа пятен на Солнце. Для объяснения данного феномена предлагается физическая гипотеза, учитывающая все наблюдаемые экспериментальные факты. Проанализирована временная динамика изменения коэффициента $\alpha(0,45)$ и УФ-потока с 1 по 24 июня. Наличие в обоих случаях близкой по периоду синфазной низкочастотной составляющей колебаний позволяет предположить о существовании слабого, но все же заметного влияния УФ-радиации Солнца на оптические характеристики аэрозоля нижней тропосферы.

Введение

В настоящее время уже хорошо известно, что атмосферный аэрозоль (как субмикронный, так и грубодисперсный) является важным климатообразующим фактором, и это обстоятельство учитывается во всех современных климатических моделях (см. обзоры [1–3]). Более того, в [3], приводятся оценки численного моделирования, согласно которым среднеглобальное климатическое радиационное воздействие за счет аэрозоля близко к таковому для парниковых газов. Это обстоятельство и имеющийся дефицит данных о крайне изменчивых свойствах аэрозоля определяют актуальность и важность экспериментальных оптико-микрофизических исследований аэрозоля как в высоких слоях атмосферы, так и в приземном слое.

Известно, что оптические характеристики атмосферного аэрозоля зависят от многих факторов. В частности, величина и спектральная структура коэффициента аэрозольного ослабления $\alpha(\lambda)$ в видимой и ИК-областях длин волн в атмосферных дымках существенно зависят от региона, от сезона года и времени суток. Однако и внутри одного сезона суточная динамика коэффициента $\alpha(\lambda)$ может заметно изменяться, что свидетельствует о проявлении каких-то других скрытых факторов, которые при определенных условиях вносят заметный вклад в изменчивость оптических свойств аэрозоля.

Изучение таких факторов в приземном слое атмосферы представляет несомненный интерес. К их числу в соответствии с выводами работ [4–7] предварительно можно отнести: *напряженность атмосферного электрического поля, интенсивность*

потока ультрафиолетовой (УФ) радиации и солнечную активность.

Выбор перечисленных факторов сделан из следующих соображений. Если предположить, что значительная часть субмикронного аэрозоля в атмосфере образуется в результате старения тонкодисперсного фотохимического аэрозоля, формирующегося из газовой фазы под воздействием УФ-излучения Солнца [4], то вариации УФ-потока, обусловленные изменением числа солнечных пятен [5], могут приводить к изменениям концентрации субмикронного аэрозоля и к соответствующим изменениям аэрозольного ослабления в коротковолновой области длин волн. В свою очередь рост тонкодисперсного аэрозоля в основном идет за счет процесса конденсации пересыщенного водяного пара на «ядрах конденсации» т.е. на частицах, размеры которых больше некоторой критической величины. Появление на такой нейтральной частице элементарного заряда приводит к уменьшению критического размера частиц, на которых может происходить конденсация водяного пара, и, следовательно, увеличивает число оптически активных частиц [6].

Кроме того, наличие заряда на частицах увеличивает эффективность коагуляционных процессов (особенно для разноименно заряженных частиц). Зарядка частиц аэрозоля может происходить в результате диффузионного стока легких ионов при их движении в электрическом поле атмосферы [7]. Это позволяет рассматривать атмосферное электричество в качестве одного из факторов, влияющих на оптические свойства атмосферного аэрозоля.

Первые экспериментальные данные исследований в этом направлении нами были опубликованы

в работе [8] в 2002 г. В частности, было показано, что в безоблачный день наблюдается заметная трансформация функции распределения микродисперсного аэрозоля с изменением интенсивности УФ-потока. Этот вывод был сделан на основе анализа временной динамики спектра размеров и концентрации микродисперсных частиц в период с 10 до 16 ч в один из измерительных дней. Оказалось, что если в 10 ч утра в районе измерений наблюдалась фракция частиц с максимумом (по диаметру) 12–13 нм и с концентрацией около 4000 см^{-3} , то к 12 ч максимум распределения постепенно сместился в область 20 нм, а к 16 ч – в область 35–40 нм. При этом максимальная концентрация частиц ($8000\text{--}9000 \text{ см}^{-3}$) наблюдается в период с 11 до 13 ч и приходится на восходящую ветвь дневного хода интенсивности УФ-потока. Обнаруженные закономерности в дневной динамике спектра размеров и концентрации микродисперсных частиц в условиях безоблачной погоды однозначно свидетельствуют о влиянии УФ-излучения Солнца на процесс генерации атмосферного аэрозоля.

Кроме того, была выявлена необычная закономерность, заключающаяся в том, что при малооблачной погоде с увеличением УФ-потока ($\lambda = 0,353 \text{ мкм}$) напряженность электрического поля падает (коэффициент корреляции $\rho = -0,67$). В принципе это означает, что с ростом УФ-потока в нижней атмосфере увеличивается число легких ионов, дающих основной вклад в проводимость воздуха [7], что и приводит к уменьшению напряженности поля. Нужно заметить, что непосредственно УФ-излучение с $\lambda > 0,3 \text{ мкм}$ не может создавать ионизацию в молекулярной среде, поскольку потенциалы ионизации основных и примесных молекул атмосферы лежат в более коротковолновой области ультрафиолета, не достигающей поверхности Земли из-за поглощения озоном. Для объяснения обнаруженного факта было сделано предположение, что в течение дня под воздействием УФ-излучения при наличии в тропосфере органических загрязнений снижается потенциал ионизации молекул и идет образование легких ионов нанометрового размера.

В настоящей статье продолжены исследования, начатые в [8].

Заметим, что подобные исследования могут представлять определенный интерес и для проблемы, связанной с изучением физических причин влияния вариаций солнечной активности на погоду и климат Земли, которая в последние 20–30 лет весьма активно обсуждается [9–11].

Описание эксперимента

Работа проводилась в период со 1 по 24 июня 2004 г. на восточной окраине г. Томска. Комплексные натурные исследования включали в себя круглосуточные синхронные измерения спектральных коэффициентов аэрозольного ослабления в приземных дымках (в области $0,44\text{--}12 \text{ мкм}$), напряженности атмосферного электрического поля, интенсив-

ности потока УФ-радиации Солнца (в полосе В) и дисперсного состава и концентрации аэрозольных частиц (радиус $> 0,2 \text{ мкм}$).

Измерения прозрачности атмосферы выполнялись с периодичностью 2 ч с помощью двухканального автоматизированного фильтрового фотометра [10], работающего в области длин волн $\lambda = 0,44 \pm 12 \text{ мкм}$ в 22 участках спектра. Фотометр работал по схеме с отражением на базе $\sim 415 \text{ м}$ (общая длина измерительной трассы составляет $\sim 830 \text{ м}$). В качестве отражателя излучения в конце трассы использовался зеркальный катафот с диаметром главного зеркала 500 мм и фокусным расстоянием 1500 мм. Один цикл измерений составлял 30 мин с 20-секундным усреднением сигналов на каждой длине волны. За время одного цикла регистрировалось 6 спектров пропускания атмосферы, которые при обработке усреднялись (если не наблюдался выраженный временной тренд этого параметра).

Из полученных спектров пропускания атмосферы по методике, изложенной в [10], рассчитывались спектральные коэффициенты аэрозольного ослабления $\alpha(\lambda)$. Случайная погрешность определения коэффициента ослабления при единичном измерении составляла $0,02\text{--}0,03 \text{ км}^{-1}$.

Напряженность поля E измерялась ежеминутно на стационарном электростатическом флюксметре «Поле-2». Суммарный УФ-поток в полосе В ($\lambda = 0,28 \div 0,32 \text{ мкм}$) измерялся с помощью серийного ультрафиолетового пиранометра UVB-1 (США) на ГОР-станции Института оптики атмосферы. Измерения велись круглосуточно с периодичностью 1 ч. Для измерений дисперсного состава и концентрации аэрозольных частиц в атмосфере использовался автоматизированный оптический счетчик аэрозоля АЗ-5, расположенный также на ГОР-станции и работающий с периодичностью 1 ч. К сожалению, во время этих измерений по техническим причинам не работал диффузионный спектрометр нанометровых частиц.

В результате измерений был сформирован общий массив данных, насчитывающий 150 совместных усредненных реализаций.

Результаты эксперимента

На рис. 1,а приведен временной ход коэффициента аэрозольного ослабления $\alpha(0,45)$ и напряженности атмосферного электрического поля за весь период измерений. Видно, что в диапазоне $N = 10 \div 95$, что соответствует временному периоду примерно со 2 по 12 июня, вариации параметров $\alpha(0,45)$ и E находятся в противофазе – с ростом аэрозольного замутнения в атмосфере напряженность электрического поля падает, и наоборот. Далее, в диапазоне $N = 95 \div 150$ эта закономерность уже не проявляется.

В качестве количественной оценки отрицательной взаимосвязи вариаций $\alpha(0,45)$ и E может служить нормированный коэффициент корреляции между ними $\rho = -0,70$, представленный на рис. 1,б.

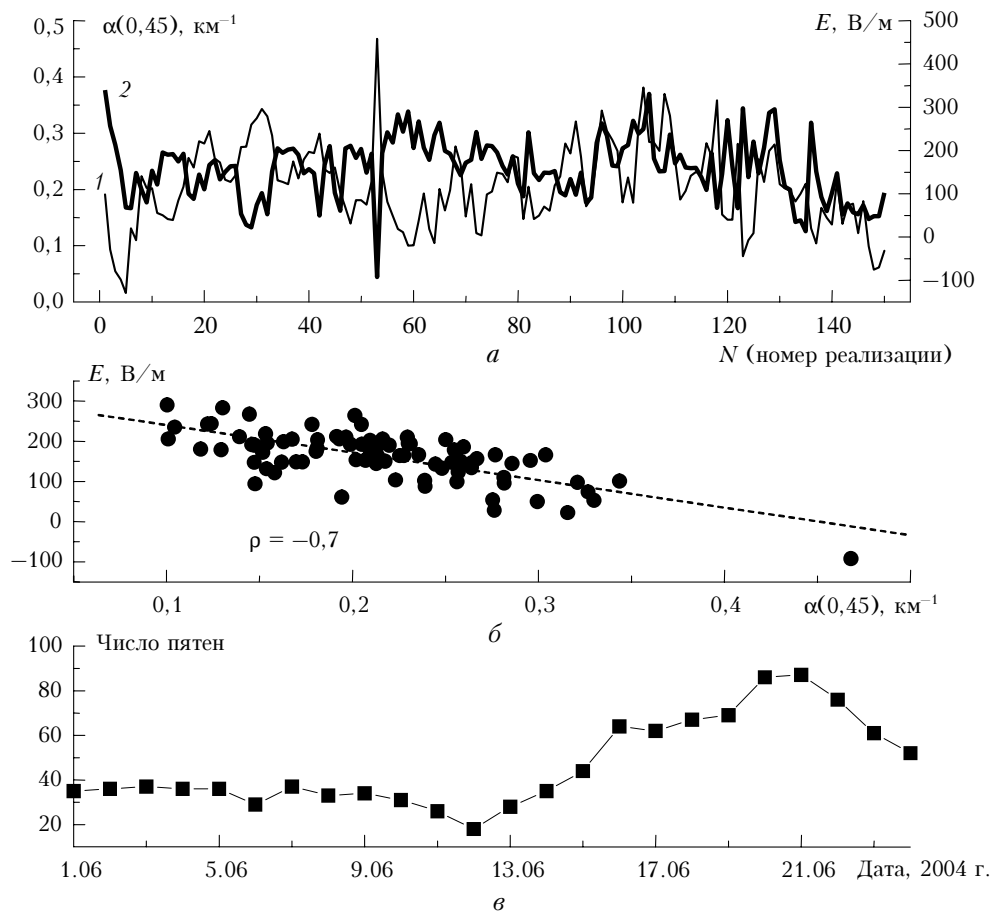


Рис. 1. Временной ход коэффициента $\alpha(0,45)$ (кривая 1) и напряженности атмосферного электрического поля (2) за весь период измерений (а); статистическая связь параметров E и $\alpha(0,45)$ в период со 2 по 12 июня (б); временной ход числа солнечных пятен за весь период измерений (в)

Следует особо отметить, что полученная обратная связь аэрозольного замутнения атмосферы с напряженностью электрического поля противоречит известному электрооптическому соотношению [11], в соответствии с которым с ростом замутнения атмосферы в условиях хорошей погоды, за счет абсорбции части легких ионов на аэрозольные частицы, напряженность поля также возрастает.

Для объяснения выявленного противоречия были подробно проанализированы условия измерений, включая активность Солнца в этот временной период. В качестве количественной характеристики солнечной активности было взято число солнечных пятен, заимствованное нами из сети Интернета [12]. На рис. 1, в приведен временной ход числа солнечных пятен для июня 2004 г. Как видно, именно в период со 2 по 12 июня, когда в измерениях наблюдалась выраженная обратная зависимость между параметрами $\alpha(0,45)$ и E , имел место минимум солнечных пятен, т.е. это был период спокойного Солнца. Это чрезвычайно интересный факт, и его еще предстоит интерпретировать. Продолжительность события позволяет надеяться, что это не случайное стечение обстоятельств.

Для того чтобы хоть как-то понять физическую сущность отрицательной связи между динамикой

аэрозольного ослабления на длине волны 0,45 мкм и напряженности электрического поля, нужно прежде всего выяснить природу временных вариаций $\alpha(0,45)$.

С этой целью на рис. 2 приведен временной ход коэффициентов $\alpha(0,45)$ и $\alpha(3,91)$ с 1 по 12 июня. Полная синхронность вариаций этих величин однозначно указывает на то, что в данном случае практически всю изменчивость коэффициентов $\alpha(0,45)$ определял грубодисперсный аэрозоль. Более того, из рис. 2 видно, что вариации грубодисперсного аэрозоля не только полностью формируют динамику изменчивости аэрозольного ослабления в видимом диапазоне, но и в значительной мере определяют его уровень, особенно в период со 2 по 7 июня. Роль субмикронного аэрозоля в указанный период была очень мала. Это означает, что выявленная отрицательная корреляция напряженности атмосферного электрического поля с коэффициентом $\alpha(0,45)$, по сути, обусловлена динамикой грубодисперсных частиц.

Для количественной оценки такого заключения был проведен расчет компонент аэрозольного ослабления, обусловленных субмикронными $-\Delta\alpha_{сб}$, среднечисленными $-\Delta\alpha_{ср}$ и грубодисперсными $\Delta\alpha_{гд}$ частицами. Значения величин $\Delta\alpha_{сб}$, $\Delta\alpha_{ср}$ и $\Delta\alpha_{гд}$

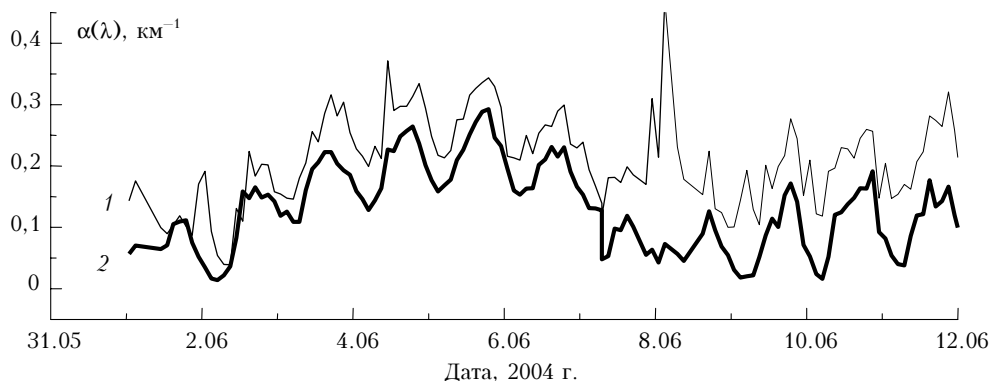


Рис. 2. Временная динамика коэффициентов $\alpha(0,45)$ и $\alpha(3,91)$ в период с 1 по 12 июня (1 – $\lambda = 0,45$; 2 – 3,91 мкм)

находились как разности линейных комбинаций (осредненных по спектральному интервалу) значений коэффициентов $\alpha(\lambda)$:

$$\Delta\alpha_{с6} = [\alpha(0,45) + \alpha(0,48) + \alpha(0,55)]/3 - [\alpha(0,69) + \alpha(0,87) + \alpha(1,06)]/3, \quad (1)$$

$$\Delta\alpha_{ср} = [\alpha(0,69) + \alpha(0,87) + \alpha(1,06)]/3 - [\alpha(1,6) + \alpha(2,17) + \alpha(3,91)]/3, \quad (2)$$

$$\Delta\alpha_{гд} = [\alpha(1,6) + \alpha(2,17) + \alpha(3,91)]/3. \quad (3)$$

Затем был проведен расчет коэффициентов корреляции вариаций этих компонент с вариациями напряженности электрического поля.

Оказалось, что корреляция вариаций напряженности поля с субмикронной компонентой коэффициента $\alpha(0,45)$ составляет +0,29, со среднечастотной –0,42, а с грубодисперсной –0,62.

Как мы и предполагали, основная доля скоррелированных вариаций $\alpha(0,45)$ и E приходится на грубодисперсную компоненту коэффициента $\alpha(0,45)$. При этом субмикронная компонента имеет слабую положительную корреляцию с электрическим полем, что хорошо соответствует существующим представлениям об осаждении легких ионов на мелкие частицы.

Используя в качестве оценки грубодисперсной компоненты коэффициент аэрозольного ослабления в области $\lambda = 3,91$ мкм, была выявлена ее явная суточная динамика, представленная на рис. 3 на примере 3 сут.

Из рис. 3 виден четкий утренний минимум, приходящийся на 4–5 ч, и дневной максимум, расположенный в районе 16–20 ч. Здесь же приведен усредненный по всему массиву суточный ход напряженности поля E , который имеет слабо выраженные утренний максимум и вечерний минимум.

По характеру суточного хода коэффициента $\alpha(3,91)$ можно однозначно заключить, что он связан с интенсивностью солнечной инсоляции, от которой зависят температура подстилающей поверхности и конвективный вынос грубодисперсного аэрозоля. Возможно, что и суточная динамика электрического поля через какой-то параметр также связана с солнечной инсоляцией. Предположительно в качестве такого параметра может выступать степень

ионизации воздуха в приземном слое, которая, как известно, летом больше, чем зимой, а в хорошую погоду больше, чем в пасмурную. Если принять эти предположения, то можно построить следующую логическую цепочку событий.

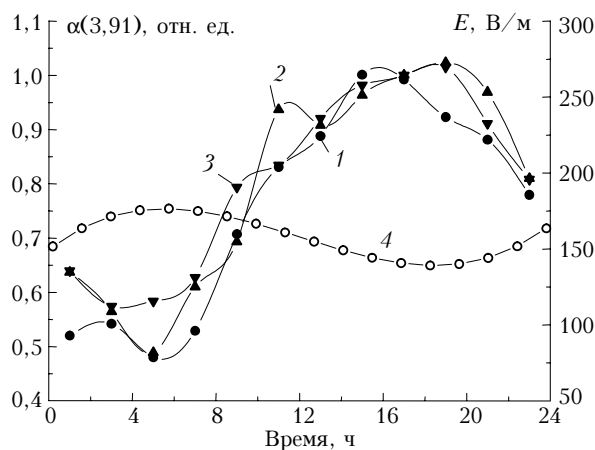


Рис. 3. Суточная динамика коэффициента аэрозольного ослабления на длине волны $\lambda = 3,91$ мкм за 3, 4 и 5 июня 2004 г. (кривые 1, 2 и 3 соответственно) и напряженности электрического поля E (4), усредненной по всему массиву данных

В период спокойного Солнца, когда интенсивность УФ-потока минимальна, фотохимические процессы образования аэрозоля заторможены. Это приводит к дефициту субмикронного аэрозоля в приземном слое, и вся изменчивость коэффициента $\alpha(0,45)$ почти полностью определяется суточной динамикой грубодисперсного аэрозоля. Последняя, в свою очередь, определяется температурной конвекцией с утренним минимумом и послеобеденным максимумом. Электрическое поле при дефиците субмикронного аэрозоля в среднем изменяется только за счет суточного изменения степени ионизации воздуха, обусловленного солнечной инсоляцией, и имеет, соответственно, ночной максимум (минимум аэроионов) и дневной минимум (максимум аэроионов). Это объясняет наличие отрицательной корреляции коэффициента аэрозольного ослабления $\alpha(0,45)$ и напряженности электрического поля.

Разумеется, что предложенная схема пока является в значительной степени умозрительной.

В заключение посмотрим, существует ли какая-либо связь между аэрозольным ослаблением оптического излучения и УФ-радиацией Солнца. Очевидно, что искать ее следует в самой коротковолновой части спектра. С этой целью на рис. 4 приведен сглаженный временной ход коэффициента аэрозольного ослабления $\alpha(0,45)$ и среднего за день УФ-потока за весь период измерений.

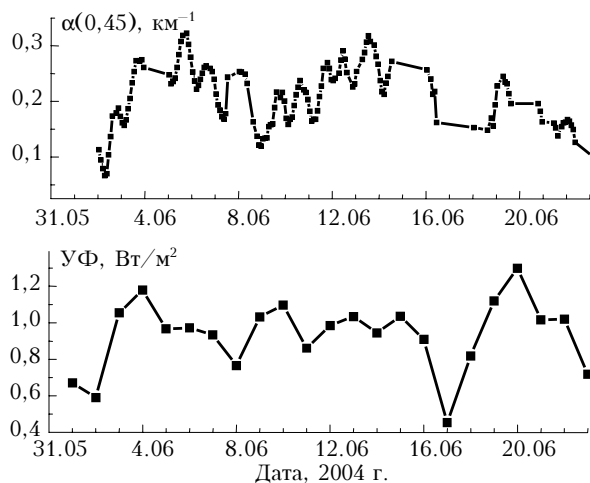


Рис. 4. Временная динамика коэффициента аэрозольного ослабления $\alpha(0,45)$ и УФ-потока (в полосе В) за весь период измерений

Отметим, что сглаживание временного хода коэффициента $\alpha(0,45)$ проведено с использованием скользящего среднего по 5 точкам, а значение УФ-потока за конкретный день находилось усреднением данных УФ-пиранометра за период с 10 до 17 ч. Видно, что на фоне рассмотренных выше суточных колебаний коэффициента $\alpha(0,45)$, обусловленных динамикой температуры, явно прослеживается более низкочастотная составляющая с периодом порядка 8 дней. Качественный анализ временного хода УФ-потока показывает, что в динамике колебаний этого параметра прослеживается, хотя и не так явно, похожая синфазная низкочастотная составляющая. Таким образом, наличие в обоих случаях близкой по периоду синфазной низкочастотной составляющей колебаний указывает на существование слабого, но все же заметного влияния УФ-

радиации Солнца на оптические характеристики аэрозоля нижней тропосферы

Авторы выражают благодарность Б.Д. Белану за предоставленные данные по метеорологическим параметрам и УФ-излучению.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 04-05-65179).

1. Кондратьев К.Я. Аэрозоль как климатообразующий компонент атмосферы. 1. Физические свойства и химический состав // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15. № 2. С. 123–146.
2. Кондратьев К.Я. Аэрозоль как климатообразующий компонент атмосферы. 2. Прямое и косвенное воздействие на климат // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15. № 4. С. 301–320.
3. Кондратьев К.Я. Радиационное возмущающее воздействие, обусловленное аэрозолем // Оптика атмосф. и океана. 2003. Т. 16. № 1. С. 5–20.
4. Розенберг Г.В. Тонкодисперсный аэрозоль и климат. // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1982. Т. 18. № 11. С. 1192–1198.
5. Ливингстон У.К. Поток солнечного излучения в системе солнечно-земных связей // Солнечно-земные связи, погода и климат / Под ред. Б. Мак-Кормака и Т. Селиги. М.: Мир, 1982. С. 61–76.
6. Ивлев Л.С., Хворостовский С.Н. Исследование воздействия космического излучения на микроструктурные параметры и оптические свойства нижней атмосферы в средних и высоких широтах. 1. Влияние зарядов на гетерогенные процессы в атмосфере // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 13. № 12. С. 1073–1080.
7. Смирнов В.В. Электрические факторы чистоты воздуха // Труды ИЭМ. 1983. Вып. 30 (104). С. 64–106.
8. Пхалагов Ю.А., Ипполитов И.И., Ужегов В.Н., Булдаков А.В., Аришинов М.Ю. Исследования взаимосвязи между УФ-потоком, напряженностью электрического поля и оптико-микрофизическими характеристиками приземного слоя атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15. № 4. С. 337–343.
9. Солнечно-земные связи, погода и климат / Под ред. Б. Мак-Кормака и Т. Селиги. М.: Мир, 1982. 382 с.
10. Пхалагов Ю.А., Ужегов В.Н., Щелканов Н.Н. Автоматизированный многоволновой измеритель спектральной прозрачности приземной атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 1992. Т. 5. № 6. С. 667–671.
11. Имянитов И.М., Шифрин К.С. Современное состояние исследований атмосферного электричества // Успехи физ. наук. 1962. Т. LXXVI. Вып. 4. С. 593–642.
12. ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/sunspot_NumBERS/

Yu.A. Pkhalagov, V.N. Uzhegov, I.I. Ippolitov, M.V. Vinarskii. Investigation of relations between optical and electric characteristics of the surface atmosphere.

The results of simultaneous investigations into variations of the optical aerosol extinction coefficients, atmospheric electric field strength, and UV flux (280–320 nm) in June 2004 near Tomsk are considered. The effect of the antiphase dynamics of the aerosol extinction coefficient at the wavelength of 0.45 μm and the electric field strength, observed for 10 days, is discussed. It is shown that this effect coincided in time with the minimum of sunspots. A physical hypothesis taking into account all the observed experimental facts is proposed to explain this phenomenon. The temporal dynamics of the coefficient $\alpha(0,45)$ and the UV flux in June 1–24 is analyzed. The presence of an in-phase low-frequency oscillation component with the close periods in the both cases suggests the existence of a weak, but still noticeable influence of the solar UV radiation on the optical characteristics of aerosol in the lower troposphere.