

## Связь аномальных атмосферных условий с изменчивостью электрического поля

Ю.А. Пхалагов<sup>1</sup>, И.И. Ипполитов<sup>2</sup>, П.М. Нагорский<sup>2</sup>, С.Л. Одинцов<sup>1</sup>,  
М.В. Панченко<sup>1</sup>, С.В. Смирнов<sup>2</sup>, В.Н. Ужегов<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

<sup>2</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН  
634021, г. Томск, пр. Академический, 10/3

Поступила в редакцию 2.10.2008 г.

На основе данных натурных измерений анализируется влияние аэрозоля на величину напряженности атмосферного электрического поля в приземном слое. Рассматриваются особенности электрооптических связей в условиях дымок и дымового смога, возникающего летом из-за лесных пожаров, а зимой вследствие скопления аэрозоля в приземном слое при возникновении температурной инверсии. Показано, что в обычных мелкодисперсных летних дымках с ростом замутнения воздуха напряженность электрического поля также возрастает за счет стока аэроионов на субмикронный аэрозоль и соответствующего уменьшения проводимости среды. В то же время в редких случаях крупнодисперсных дымок (при дефиците субмикронного аэрозоля) и в условиях летнего дымового смога наблюдается противофазное изменение аэрозольного замутнения атмосферы и напряженности электрического поля. В зимнем городском смоге, имеющем также дымовую природу, в отличие от данных, полученных в дымах лесных пожаров, с ростом замутнения атмосферы напряженность электрического поля возрастает. Обсуждаются причины обнаруженных различий влияния дымового смога разной природы на величину атмосферного электрического поля.

*Ключевые слова:* атмосферное электричество, натурные измерения, дымовой аэрозоль.

### Введение

Известно, что в атмосфере Земли постоянно существует квазистационарное электрическое поле, физическая природа которого до настоящего времени окончательно не выяснена, несмотря на обширную библиографию по данной проблеме (см., например, обзорные статьи [1–3], монографии [4, 5] и ссылки в них). Важной количественной характеристикой атмосферного электрического поля является его напряженность  $E$ , характеризующаяся широким спектром вариаций, обусловленных различными факторами.

Экспериментально установлено, что напряженность электрического поля в приземном слое атмосферы тесно связана с метеорологическими параметрами [4, 6, 7] и в условиях хорошей погоды в среднем составляет  $\sim 130$  В/м. При осадках, грозах, пыльных бурях и т.п. напряженность поля может изменяться на порядок и более.

В атмосферной дымке (относящейся к условиям хорошей погоды) важным механизмом изменчивости  $E$  является изменение числа ионизованных молекул воздуха (легких аэроионов — основных

носителей зарядов) вследствие их стока на атмосферный аэрозоль [1, 2]. Заметим, что ионизация молекул воздуха в приземном слое происходит в основном за счет естественной радиоактивности [4, 6, 8]. Уменьшение концентрации легких ионов при их стоке на частицы аэрозоля приводит к уменьшению электрической проводимости воздуха  $\gamma$  и, соответственно, к росту напряженности электрического поля. На этом основании в [1] было высказано предположение о существовании в условиях хорошей погоды детерминированной связи между напряженностью атмосферного электрического поля и метеорологической дальностью видимости  $S_m$ , которую можно представить в виде

$$E = BS_m^{-1},$$

где  $B$  — некоторая константа.

Используя известную формулу Кошмидера  $S_m = 3,9/\beta(0,55)$ , связывающую метеорологическую дальность видимости с коэффициентом аэрозольного ослабления излучения  $\beta(0,55)$  на длине волны  $\lambda = 0,55$  мкм, напряженность атмосферного электрического поля можно представить в виде

$$E = B_1\beta(0,55). \quad (1)$$

Из формулы (1) следует, что в условиях хорошей погоды с увеличением аэрозольного замутнения атмосферы напряженность поля должна возрастать.

\* Юрий Александрович Пхалагов; Иван Иванович Ипполитов; Петр Михайлович Нагорский; Сергей Леонидович Одинцов; Михаил Васильевич Панченко; Сергей Васильевич Смирнов; Виктор Николаевич Ужегов.

Для экспериментальной проверки этого соотношения и, возможно, дальнейших рекомендаций по его практическому использованию необходимы длительные комплексные исследования, включающие в себя одновременные натурные измерения оптических и электрических характеристик атмосферы в различных метеорологических условиях. В качестве оптической характеристики целесообразно использовать спектральные коэффициенты аэрозольного ослабления излучения в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн, измеренные на протяженной трассе, т.е. усредненные по большому объему.

Коэффициенты  $\beta(\lambda)$ , полученные в широком диапазоне длин волн, позволят выявить диапазон размеров аэрозольных частиц, на которые идет преимущественный сток аэроионов в дымках разной плотности, а также при других типах замутнения атмосферы.

При отсутствии трассовых измерений  $\beta(\lambda)$  для анализа взаимосвязи оптических и электрических характеристик атмосферы можно использовать данные о коэффициенте направленного светорассеяния или концентрации аэрозольных частиц разных размеров, полученные в закрытом объеме с помощью нефелометра и фотоэлектрического счетчика аэрозолей соответственно. Естественно, что при этом оптико-микрофизические характеристики будут иметь существенно меньшее усреднение по объему.

Комплексные электрооптические исследования в условиях атмосферных дымок с применением трассовых измерений коэффициентов  $\beta(\lambda)$  в широком спектральном интервале были проведены в районе г. Томска и проанализированы в работах [9, 10]. Экспериментальные данные [9], полученные в августе – сентябре 1997 г., показали, что в общем случае связь между коэффициентами  $\beta(\lambda)$  в разных участках спектра и напряженностью поля  $E$  положительная, но носит статистический характер.

Максимальные коэффициенты корреляции ( $\rho \sim 0,5$ ) между этими параметрами 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 аэроионов. Однако в работе [10], где рассматриваются результаты измерений, проводившихся в период с 1 по 24 июня 2004 г., был выявлен эффект *противофазной изменчивости* коэффициента  $\beta(0,45)$  и напряженности электрического поля, наблюдавшийся в течение 10 дней и по времени четко совпадающий с минимумом числа пятен на Солнце.

Для объяснения обнаруженного эффекта была предложена рабочая гипотеза, в соответствии с которой в период спокойного Солнца (при минимуме интенсивности УФ-потока) фотохимические процессы образования субмикронного аэрозоля заторможены и вся изменчивость коэффициента  $\beta(0,45)$  почти полностью определяется суточной динамикой концентрации грубодисперсного аэрозоля. Послед-

няя, 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 между коэффициентом аэрозольного ослабления  $\beta(0,45)$  и напряженностью электрического поля.

Полученные данные свидетельствуют о большом разнообразии электрооптических связей в приземной атмосфере и убедительно указывают на необходимость продолжения подобных комплексных исследований в различных метеорологических, синоптических и астрофизических условиях.

В связи с этим в настоящей статье была поставлена задача выяснить, как влияет на напряженность атмосферного электрического поля такой тип замутнения воздуха, как дымовой смог, возникающий летом из-за лесных пожаров, а зимой вследствие скопления аэрозоля (в том числе дымового) в подынверсионном приземном слое при определенных синоптических ситуациях.

## Дым лесных пожаров

Влияние дымов лесных пожаров на уровень напряженности атмосферного электрического поля было рассмотрено в работе [11]. За основу были взяты результаты совместных измерений коэффициентов аэрозольного ослабления оптического излучения  $\beta(\lambda)$  в области длин волн  $\lambda = 0,44 \pm 12$  мкм на протяженной приземной трассе и напряженности атмосферного электрического поля  $E$ , проводившихся в мае 2004 г. в районе г. Томска. Эти измерения сопровождалась стандартными метеонаблюдениями, а также измерениями концентрации угарного газа CO, массовой концентрации сажевого аэрозоля  $M_s$  и уровня радиационного фона  $Rf$ , которые осуществлялись на постоянно действующих станциях Института оптики атмосферы СО РАН. Всего за время измерений был получен массив, насчитывающий 140 реализаций всех перечисленных выше параметров.

Из данных метеорологических измерений следует, что в регионе в период с 15 по 21 мая наблюдались повышенные значения температуры воздуха ( $\bar{T} \sim 25^\circ\text{C}$ ) и низкая относительная влажность ( $Rh \sim 35 \div 50\%$ ). Именно в этот жаркий и сухой период в регионе наблюдалось наиболее сильное замутнение атмосферы, предположительно связанное с лесными пожарами. О дымовой природе замутнения атмосферы в этот период свидетельствует временная изменчивость коэффициента аэрозольного ослабления  $\beta(0,55)$ , концентрации угарного газа и массовой концентрации сажевого аэрозоля (рис. 1).

Практически полное соответствие временных вариаций коэффициента аэрозольного ослабления и концентрации CO и  $M_s$ , однозначно связанных

с задымлением, указывает на дымовую природу аэрозольного замутнения атмосферы в этот период.

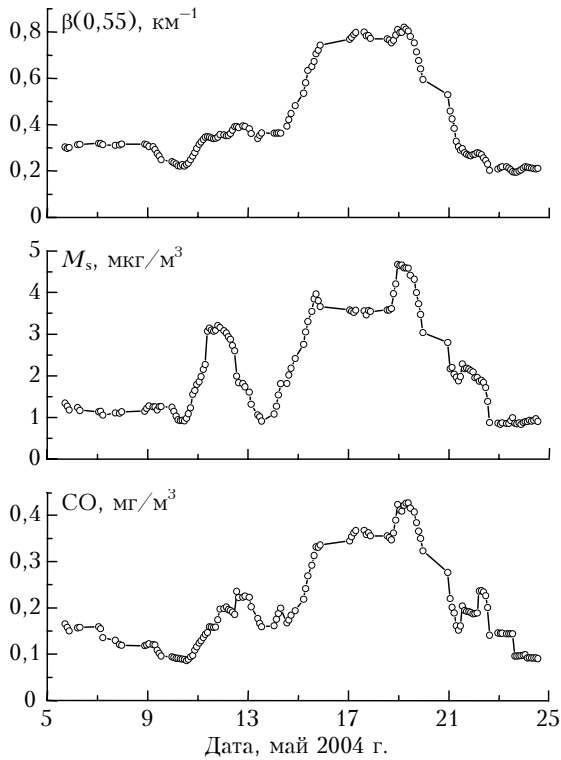


Рис. 1. Сглаженные временные ходы коэффициента аэрозольного ослабления  $\beta(0,55)$ , концентрации сажевого аэрозоля  $M_s$  и угарного газа CO в районе г. Томска в мае 2004 г.

На рис. 2 приведена сглаженная временная динамика коэффициента  $\beta(0,55)$ , характеризующего степень задымления воздуха, и напряженности атмосферного электрического поля  $E$  в период измерений.

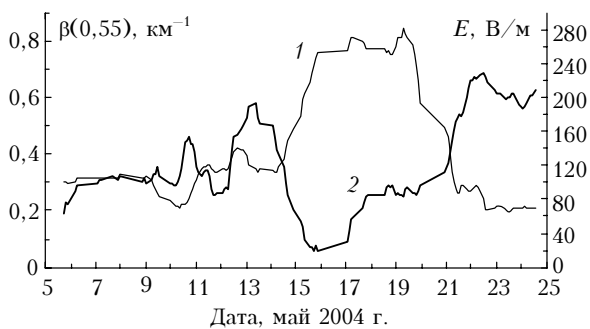


Рис. 2. Сглаженный временной ход коэффициента аэрозольного ослабления  $\beta(0,55)$  (кривая 1) и напряженности атмосферного электрического поля  $E$  (2) в летнем дымовом смоге

Видно, что с приходом в район измерений дыма лесного пожара (примерно 15 мая) коэффициент аэрозольного ослабления возрастает с  $0,3$  до  $0,8 \text{ км}^{-1}$ , а напряженность электрического поля уменьшается с  $140$  до  $20 \text{ В/м}$ . То есть во время летнего дымового смога имеет место противофазное

изменение параметров  $\beta(0,55)$  и  $E$ , что противоречит электрооптическому соотношению (1), в соответствии с которым с ростом замутнения атмосферы в условиях хорошей погоды напряженность поля также должна возрастать.

Обнаруженный эффект падения напряженности электрического поля во время летнего дымового смога, по сути, указывает на то, что с ростом концентрации частиц в дыму лесного пожара количество аэроионов в атмосфере не только не уменьшается (за счет стока ионов на аэрозоль), а значительно возрастает. По-видимому, образующийся при пожаре тонкодисперсный фотохимический аэрозоль представляет собой заряженные частицы.

### Городской зимний смог

Особенности влияния зимнего городского смога на напряженность атмосферного электрического поля рассматриваются на основе экспериментальных данных, полученных 28 января 2008 г. в районе Томска, когда регион находился под влиянием обширного блокирующего восточно-сибирского антициклона. Согласно данным метеорологических измерений, представленных на рис. 3, температура воздуха в этот день в приземном слое (на высоте около 18 м над подстилающей поверхностью) изменялась в диапазоне от  $-23$  до  $-15 \text{ }^\circ\text{C}$ , а скорость ветра в основном находилась в диапазоне  $0,5\text{--}1,0 \text{ м/с}$ .

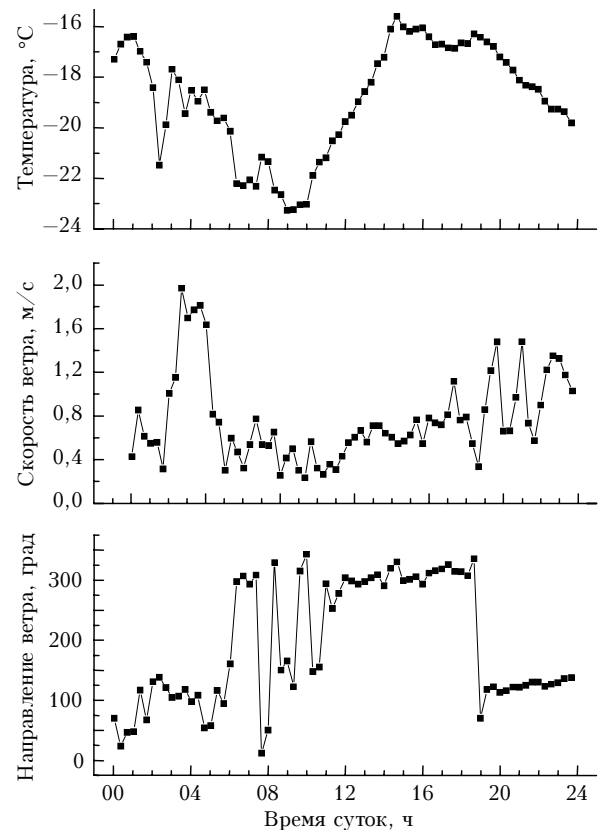


Рис. 3. Суточный ход температуры воздуха, скорости и направления ветра 28 января 2008 г. в районе г. Томска

Кроме метеорологических измерений в районе наблюдения, с помощью содара проводился контроль структуры пограничного слоя атмосферы. Согласно полученным результатам обменные процессы в нижнем слое тропосферы в этот день были достаточно слабыми, о чем свидетельствуют эхограммы содара, показанные на рис. 4 и отражающие структуру турбулентных пульсаций температуры.

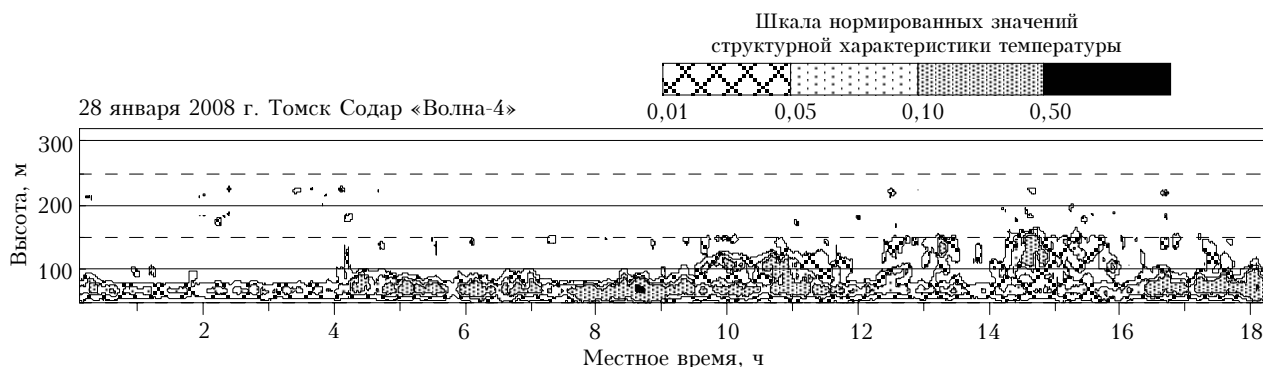


Рис. 4. Эхограммы содара, отображающие высотное-временное распределение нормированных на максимум значений структурной характеристики пульсаций температуры. Проведено сглаживание данных по высоте и по времени скользящим средним

Известно, что в условиях инверсии температуры при слабых ветрах вертикальные турбулентные потоки тепла и аэрозоля существенно ослаблены. В этой связи эхограммы содара являются достаточно надежным источником текущей информации о вертикальной протяженности области интенсивного турбулентного обмена между атмосферой и подстилающей поверхностью, поскольку фиксируют даже небольшие по амплитуде случайные пульсации температуры.

Обработка эхограмм показала, что на протяжении суток 28 января 2008 г. высота области интенсивного турбулентного обмена в основном не превышала 100–150 м, достигая в дневное время 220–230 м. При этом структура эхограмм явно указывает на сохранение в течение суток инверсии температуры в нижнем слое атмосферы, что следует, в частности, и из эпизодического появления достаточно тонких приподнятых слоев с повышенной температурной турбулентностью, порождаемой сдвиговыми напряжениями в стратифицированном по высоте потоке ветра. Подобная ситуация характерна для устойчивого пограничного слоя атмосферы.

В результате температурной инверсии в приземном слое атмосферы произошло значительное скопление аэрозоля, концентрация которого возросла с 50 до 230  $\text{см}^{-3}$ , а метеорологическая дальность видимости  $S_m$  уменьшилась до 0,4–0,5 км. Такую оптическую ситуацию можно характеризовать как смоговую. Развитие этого смогового эпизода началось около 08 ч местного времени, максимум замутнения атмосферы наблюдался в период с 14 до 16 ч, после чего начался распад смога (с 16 до 23 ч).

Для получения количественных оценок влияния зимнего городского смога на напряженность атмосферного электрического поля были привлечены

данные Аэрозольной станции и TOR-станции Института оптики атмосферы, включающие в себя: коэффициент направленного светорассеяния  $\mu(\varphi)$ , счетную концентрацию аэрозольных частиц  $N$ , концентрацию сажевых частиц  $M_s$  и содержание угарного газа (СО). Напряженность атмосферного электрического поля измерялась в Институте мониторинга климатических и экологических систем СО РАН.

Для анализа синоптической обстановки использовались свободно распространяемые данные метеорологических наблюдений Росгидромета.

Для того чтобы выяснить, какова природа частиц, преобладающих в данном смоге, дымовая или минеральная, на рис. 5, по аналогии с [11], приведен временной ход коэффициента направленного светорассеяния  $\mu(\varphi)$ , характеризующего степень замутнения атмосферы, концентрации угарного газа СО и сажеосодержащего аэрозоля  $M_s$  за этот день.

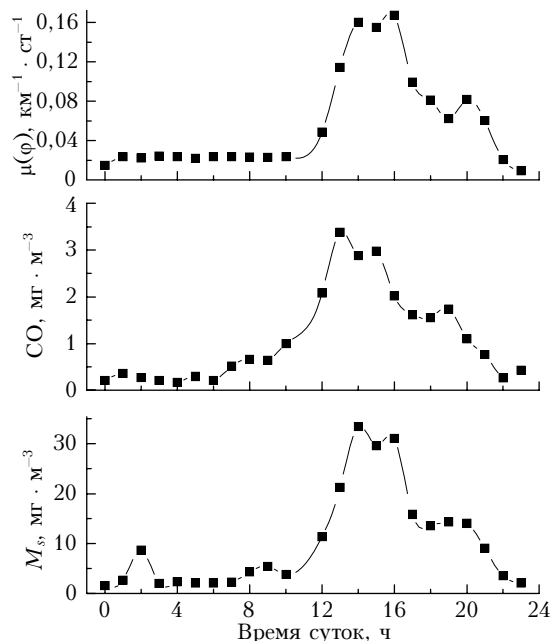


Рис. 5. Зимний городской смог. Суточный ход коэффициента направленного светорассеяния  $\mu(\varphi)$ , концентрации угарного газа СО и сажеосодержащего аэрозоля  $M_s$  28 января 2008 г.

Хорошо видна синхронность в изменчивости всех перечисленных характеристик, что убедительно указывает на дымовую природу зимнего городского смога.

На рис. 6 представлены временные ходы напряженности поля  $E$ , измеренной электростатическим флюксометром «Поле-2», и концентрации  $N$  аэрозольных частиц в атмосфере, измеренной фотоэлектрическим счетчиком АЗ-5.

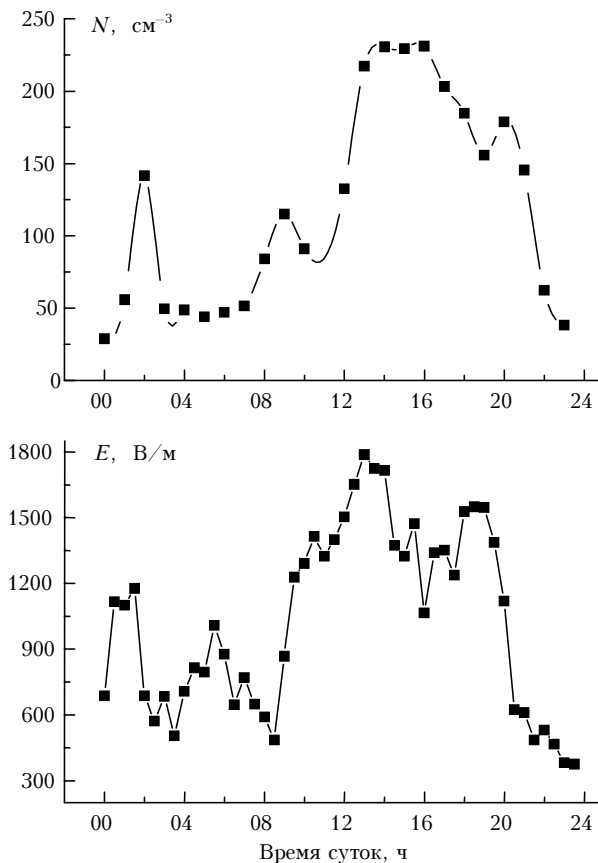


Рис. 6. Зимний городской смог. Временной ход концентрации аэрозольных частиц  $N$  и напряженности электрического поля  $E$  28 января 2008 г.

Как следует из рис. 6, по мере развития смоговой ситуации концентрация аэрозоля в приземном слое возросла с  $50 \text{ см}^{-3}$  (в 06.00) до  $230 \text{ см}^{-3}$  (в 13.00), а напряженность атмосферного электрического поля за это время также возросла в среднем с 800 до 1800 В/м. Заметим, что завышенные значения напряженности поля в данном эксперименте, вероятно, связаны с тем, что датчик электрического поля в этих измерениях был установлен на крыше здания на высоте  $\sim 24$  м и для приведения их к уровню земли следует вводить соответствующий корректирующий коэффициент. Однако в данном случае нас интересуют, главным образом, относительные изменения параметров  $N$  и  $E$  при появлении дымового смога. С учетом этого замечания можно констатировать, что в зимнем городском

смоге, имеющем дымовую природу, в отличие от данных, полученных в дымах лесных пожаров, с ростом замутнения атмосферы напряженность электрического поля возрастает. То есть в данном случае электрооптическое соотношение (1) выполняется.

Обнаруженные различия влияния дымового смога разной природы на величину атмосферного электрического поля пока объяснить не удастся. Можно лишь предполагать, что при лесном пожаре (условно, при открытом огне) дымовой аэрозоль изначально является заряженным, что приводит к снижению напряженности поля.

Во втором случае, при зимнем дымовом смоге (без огня) аэрозольные частицы в основном являются нейтральными и служат стоком для аэроионов, что приводит к уменьшению проводимости воздуха и, соответственно, к росту напряженности электрического поля.

Работа выполнена при финансовой поддержке РАН (программа ОФН 2.12 и ОНЗ 7.11) и СО РАН № 7.10.1.1 «Исследование климатообразующих атмосферных процессов с учетом воздействия глобальных и региональных факторов».

1. *Имянитов И.М., Шифрин К.С.* Современное состояние исследований атмосферного электричества // Успехи физ. наук. 1962. Т. 76. Вып. 4. С. 593–641.
2. *Кузнецов В.В.* Атмосферное электрическое поле: факты, наблюдения, корреляции, модели // Сб. трудов III Междунар. конф. «Солнечно-земные связи и электромагнитные предвестники землетрясений». ИКИР, 2004. Т. 1. С. 165–196.
3. *Смирнов В.В.* Электрические факторы чистоты воздуха // Тр. ИЭМ. 1983. Вып. 30 (104). С. 64–106.
4. *Красногорская Н.В.* Электричество нижних слоев атмосферы и методы его измерения. Л.: Гидрометеониздат, 1972. 323 с.
5. *Солнечно-земные связи, погода и климат* / Под ред. Б. Мак-Кормака и Т. Селиги. М.: Мир, 1982. 382 с.
6. *Шулейкин В.Н.* Атмосферное электричество и физика Земли. М., 2006. 159 с.
7. *Анисимов С.В., Мареев Е.А.* Аэроэлектрические структуры в атмосфере // Докл. РАН. 2000. Т. 37. № 1. С. 101–104.
8. *Фирстов П.П., Чернева Н.В., Пономарев Е.А., Бузевич А.В.* Подпочвенный радон и напряженность электрического поля атмосферы в районе Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона // Вестн. КРАУНЦ. Серия науки о земле. 2006. № 1. Вып. 7. С. 102–109.
9. *Пхалагов Ю.А., Ужegov В.Н., Овчаренко Е.В., Генин В.Н., Донченко В.А., Кабанов М.В., Щелканов Н.Н.* Исследование корреляционных связей аэрозольного ослабления оптического излучения с напряженностью атмосферного электрического поля // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12. № 2. С. 105–108.
10. *Пхалагов Ю.А., Ужegov В.Н., Итолитов И.И., Винарский М.В.* Исследования взаимосвязей оптических и электрических характеристик приземной атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18. № 5–6. С. 416–420.

*Yu. A. Pkhalagov, I. I. Ippolitov, P. M. Nagorsky, S. L. Odintsov, M. V. Panchenko, S. V. Smirnov, V. N. Uzhegov.* **Influence of anomalous atmospheric optical conditions on the electrical field variability.**

Aerosol influence on the electric field intensity in the atmospheric surface layer is analyzed based on experimental data. The features of electrooptical relations in haze conditions produced in summer by forest fires and by aerosol accumulation during winter surface inversions are discussed. We determined that in summer optical hazes, containing fine aerosol, the electric field intensity and the atmospheric turbidity increase and the air conductivity decreases due to aeroion sink on submicrometer aerosol particles. However, sometimes in summer smogs/smokes, containing coarse aerosol particles, the electric field intensity and the atmospheric turbidity change reversely, though in winter smogs/smokes the electric field intensity and the atmospheric turbidity also change in phase. The reasons of different influence of smogs/smokes of different various origins on the electric field intensity are discussed.