

## Исследования изменчивости и взаимосвязи оптических и электрических характеристик приземной атмосферы в зимних условиях

Ю.А. Пхалагов<sup>1</sup>, В.Н. Ужегов<sup>1</sup>, В.В. Польшкин<sup>1</sup>, В.С. Козлов<sup>1</sup>,  
И.И. Ипполитов<sup>2</sup>, П.М. Нагорский<sup>2\*</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, Томск, пр. Академический, 10/3

Поступила в редакцию 3.08.2010 г.

Проведены комплексные натурные исследования изменчивости и взаимосвязи оптических и электрических характеристик приземной атмосферы в зимних условиях. Показано, что наблюдаемые в городах плотные зимние дымки, возникающие в штилевых условиях, по совокупности признаков могут быть идентифицированы как городской зимний смог. Сравнительный анализ временной изменчивости коэффициента аэрозольного ослабления и напряженности атмосферного электрического поля в зимний период показал, что атмосферное электричество через диффузионный механизм заряда микродисперсного аэрозоля влияет на оптические свойства атмосферы. Сделано предположение, что рост напряженности электрического поля в зимних дымках в штилевых условиях может служить предвестником образования смоговой ситуации.

*Ключевые слова:* аэрозольное ослабление, зимняя дымка, зимний городской смог, атмосферное электричество; aerosol extinction, winter haze, winter urban smog, atmospheric electricity.

### Введение

Как известно, атмосфера приземного слоя представляет собой слабоионизованную аэрозольно-газовую среду, находящуюся в электрическом поле Земли [1–3]. Это позволяет предположить, что процессы образования и трансформации атмосферного аэрозоля должны быть каким-то образом связаны с электрическими процессами в атмосфере и, наоборот, электрические характеристики атмосферы должны зависеть от состава и концентрации аэрозоля, определяющего оптические свойства атмосферы. Для установления этих взаимосвязей необходимы комплексные экспериментальные исследования временной изменчивости электрических и оптических характеристик в приземном слое атмосферы при различных типах замутнения. При этом в качестве электрической характеристики атмосферы можно использовать напряженность электрического поля  $E$ , а в качестве оптического параметра – спектральные коэффициенты аэрозольного ослабления  $\beta(\lambda)$  в широком диапазоне длин волн.

Исследования по изучению влияния степени замутнения атмосферы на напряженность поля  $E$  проводились авторами ранее в условиях летних дымок разной плотности [4, 5], в дымах лесных пожаров [6], а также в зимнем городском смоге, наблюдавшемся в течение одного дня в январе 2008 г. [7]. Результаты этих исследований оказались весьма неожиданными. Так, если в летних дымках средней плотности с ростом коэффициента  $\beta(\lambda)$  напряженность поля в целом также возрастала [4], то в слабых дымках (в условиях высокой видимости) имела место противофазная изменчивость этих двух параметров [5]. В дымах лесных пожаров с ростом задымления воздуха напряженность поля резко падала (с 200 до 30 В/м) [6], в то время как в условиях зимнего городского смога, который по уровню концентрации угарного газа и сажевого аэрозоля очень напоминает дым лесного пожара, наблюдался рост напряженности атмосферного электрического поля (с 50 до 230 В/м) с усилением плотности смога [7]. Полученные данные свидетельствуют о большом разнообразии электрооптических связей в приземной атмосфере, и для их изучения необходимо продолжать эти работы в различных метеорологических, синоптических и астрофизических условиях.

В настоящей статье обсуждаются результаты более продолжительной серии исследований взаимосвязей электрических и оптических характеристик атмосферы в зимних условиях в районе г. Томска.

\* Юрий Александрович Пхалагов (pkhalagov@iao.ru); Виктор Николаевич Ужегов (uzhegov@iao.ru); Виктор Викторович Польшкин (victor@iao.ru); Валерий Степанович Козлов (vkozlov@iao.ru); Иван Иванович Ипполитов (seo@imces.ru); Петр Михайлович Нагорский.

## Описание эксперимента

Исследования проводились в период с 11 по 31 декабря 2008 г. при температуре воздуха от  $-6$  до  $-27$  °С (при среднем значении 19 °С) и относительной влажности от 69 до 99% (при среднем значении 90%). В течение этого периода осуществлялись одновременные круглосуточные измерения спектрального пропускания атмосферы  $T(\lambda)$  в области длин волн  $\lambda = 0,44 \div 3,91$  мкм и напряженности атмосферного электрического поля  $E$ . Для измерения  $T(\lambda)$  использовалась схема с отражением, общая длина трассы  $L \sim 1000$  м. Приемопередающая аппаратура располагалась в корпусе Института оптики атмосферы на высоте  $\sim 15$  м, а зеркальный отражатель системы катафот – на крыше 12-этажного дома (высота  $\sim 40$  м). Измерения  $T(\lambda)$  осуществлялись круглосуточно с периодичностью 2 ч с помощью автоматизированного фильтрового фотометра [8]. Длительность цикла составляла 30 мин. За это время последовательно регистрировалось шесть серий сигналов на каждой длине волны, которые при обработке усреднялись.

Следует заметить, что предварительно из массива убирались данные, полученные при снегопадах, поскольку с позиций атмосферного электричества последние относятся к условиям «нарушенной погоды». По полученным массивам сигналов статистически оценивались коэффициенты общего ослабления оптического излучения на протяженной трассе  $\epsilon(\lambda) = -\ln[T(\lambda)]/L$ , из которых затем по методикам [9, 10], основанным на аппарате множественной линейной регрессии, выделялись коэффициенты аэрозольного ослабления  $\beta(\lambda)$ . Измерения напряженности атмосферного электрического поля  $E$  осуществлялись ежеминутно на стационарном электростатическом флюксметре «Поле-2», размещенном на крыше Института мониторинга климатических и экологических систем на высоте  $\sim 20$  м. Для формирования общего массива данных проводилось 30-минутное усреднение полученных значений  $E$ . Общий массив данных составил 113 усредненных циклов.

Все оптические и электрические измерения сопровождалось стандартными метеонаблюдениями. Параллельно на постоянно действующих станциях Института оптики атмосферы СО РАН (аэрозольной станции и ТОР-станции) осуществлялись измерения счетной концентрации аэрозольных частиц  $N$  в диапазоне диаметров 0,4–10 мкм (фотоэлектрический счетчик ПКГТА), угарного газа СО (мг/м<sup>3</sup>), массовой концентрации сажи в аэрозоле  $M_c$  (мкг/м<sup>3</sup>) (аэталометр) и уровня радиационного фона  $R_\phi$  (мкР/ч). Кроме того, на ультразвуковой метеостанции АМК-03 Института мониторинга климатических и экологических систем измерялись турбулентные характеристики атмосферы и, в частности, вертикальный поток импульса  $\tau$  (кг/мс<sup>2</sup>).

## Результаты измерений

В результате проведенных исследований были получены временные ходы всех вышеуказанных па-

раметров атмосферы и проведен их сравнительный анализ с целью:

– выявления природы плотных зимних дымок, возникающих в городах при низких температурах воздуха;

– изучения влияния атмосферного электричества на оптические характеристики атмосферы.

### 1. Зимняя дымка или зимний городской смог?

Для того чтобы выявить особенности формирования плотных зимних дымок в городских условиях, был проанализирован временной ход коэффициента аэрозольного ослабления  $\beta(\lambda)$  на длине волн  $\lambda = 0,45$  мкм в период измерений, приведенный на рис. 1.

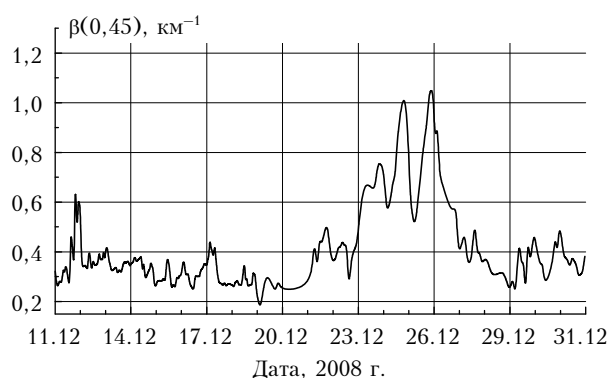


Рис. 1. Сглаженный временной ход коэффициента аэрозольного ослабления  $\beta(0,45)$ , в период с 11 по 31 декабря 2008 г.

Видно, что с 11 по 20 декабря средние значения коэффициента  $\beta(0,45)$  составляли 0,30–0,35 км<sup>-1</sup>, что по уровню замутнения атмосферы соответствует зимней дымке [11, 12]. Начиная с 21 декабря отмечается рост замутнения атмосферы, максимум которого приходится на период с 24 по 26 декабря, когда коэффициент  $\beta(0,45)$  достигал величины  $\sim 1$  км<sup>-1</sup>. Такой уровень замутнения атмосферы визуально можно отнести к плотной зимней дымке [11], к ледяному туману [12] или к зимнему городскому смогу так называемого «аласкинского типа» [13]. Последний образуется при низких температурах воздуха из автомобильных и промышленных газовых выбросов в штилевых условиях. Именно такие условия реализовались в районе измерений в период с 23 по 26 декабря, когда температура воздуха составляла от  $-15$  до  $-20$  °С, а скорость ветра была близка к нулю (рис. 2).

Приведенный на рис. 3 временной ход вертикального потока импульса  $\tau$  с выраженным минимумом в период с 23 по 26 декабря свидетельствует о подавлении вертикального выноса, что однозначно связано с существованием температурной инверсии в районе измерений.

Вследствие штилевой погоды при ослаблении процессов конвекции и адвекции в приземном слое произошли значительное скопление аэрозоля, а также

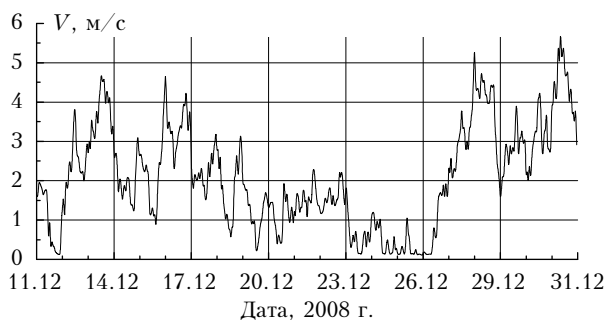


Рис. 2. Временной ход скорости ветра в период измерений. Хорошо выделяется участок с 23 по 26 декабря с минимальной скоростью ветра

увеличение концентрации угарного газа и сажевого аэрозоля, входящих в состав отработавших газов автомобилей.

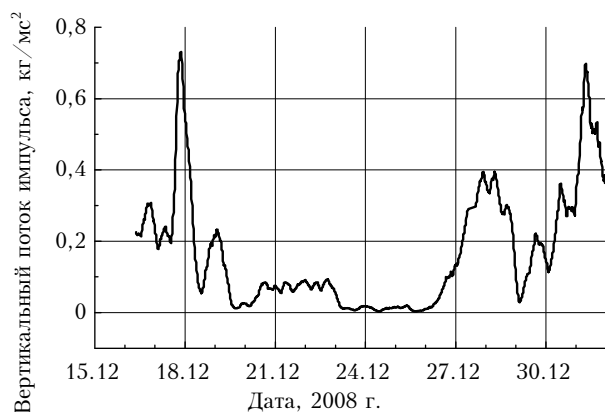


Рис. 3. Сглаженный временной ход вертикального потока импульса в период измерений

Это наглядно следует из данных, приведенных на рис. 4, где показана временная изменчивость параметров  $CO$ ,  $M_c$ ,  $N$  и коэффициентов  $\beta(0,45)$  за период с 22 по 27 декабря 2008 г.

Хорошо прослеживается синхронность в изменении вышеуказанных параметров, что свидетельствует о едином источнике аэрозольно-газового загрязнения атмосферы в этот период. Более того, характер внутрисуточной изменчивости этих компонентов (с максимумом в дневное время) позволяет предположить, что таким источником, вероятней всего, является автомобильный транспорт. Все это дает основание говорить о том, что обсуждаемый максимум замутнения атмосферы имеет смоговую природу.

Это предположение подтверждают и данные рис. 5, где представлены спектральные зависимости коэффициентов аэрозольного ослабления излучения  $\beta(\lambda)$  в диапазоне длин волн  $\lambda = 0,45 \div 3,91$  мкм, полученные до того, как образовался максимум замутнения (кривая 1), во время максимума (кривая 2) и после его распада (кривая 3).

Видно, что в обычной зимней дымке (кривые 1 и 3) спектральная структура коэффициентов  $\beta(\lambda)$  выражена довольно слабо, а уровень аэрозольного ослабления во всем диапазоне длин волн в значительной мере определяется грубодисперсными частицами

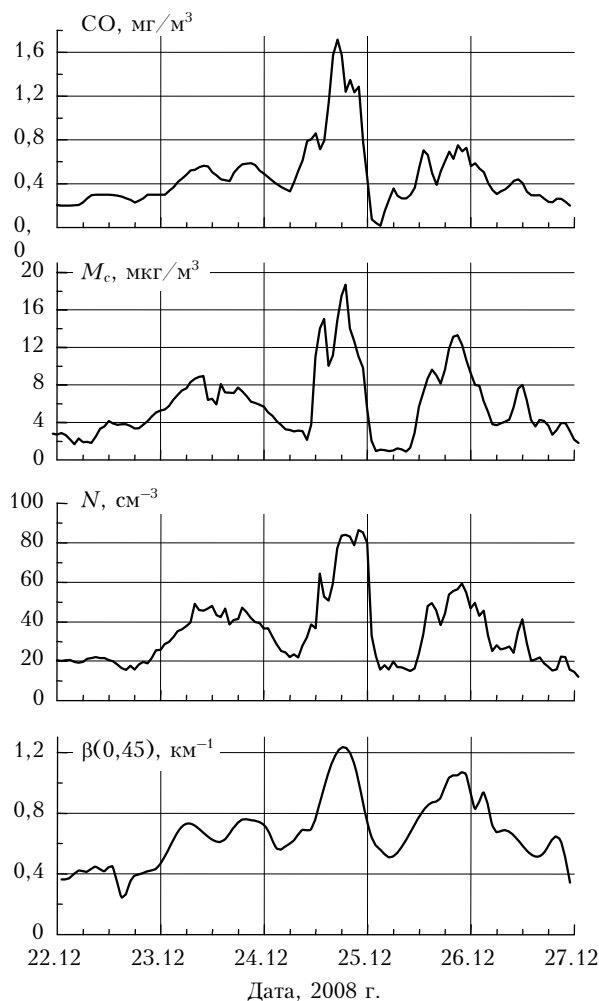


Рис. 4. Временная изменчивость концентрации угарного газа  $CO$ , сажевого аэрозоля  $M_c$ , концентрации аэрозольных частиц  $N$  и коэффициентов аэрозольного ослабления  $\beta(0,45)$

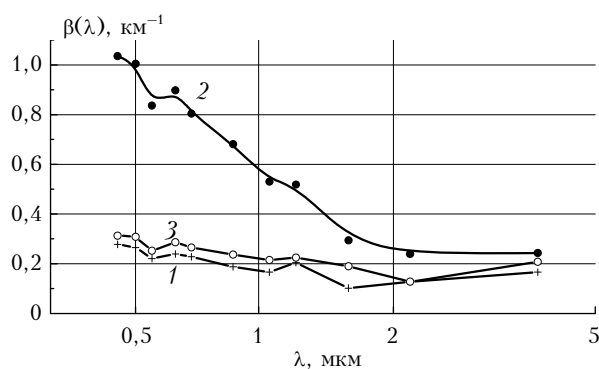


Рис. 5. Спектральные зависимости коэффициентов аэрозольного ослабления излучения  $\beta(\lambda)$ , полученные до смога (кривая 1), во время ледяного смога (2) и после распада смога (3)

(взвешенными в воздухе кристалликами льда). В то же время в период максимума (кривая 2) наблюдается сильный рост коэффициентов  $\beta(\lambda)$  в коротковолновой области длин волн, указывающий на то, что в атмосфере значительно возросла концентрация

мелкодисперсного аэрозоля. Это же подтверждают и данные микроструктурных исследований, представленные на рис. 6.

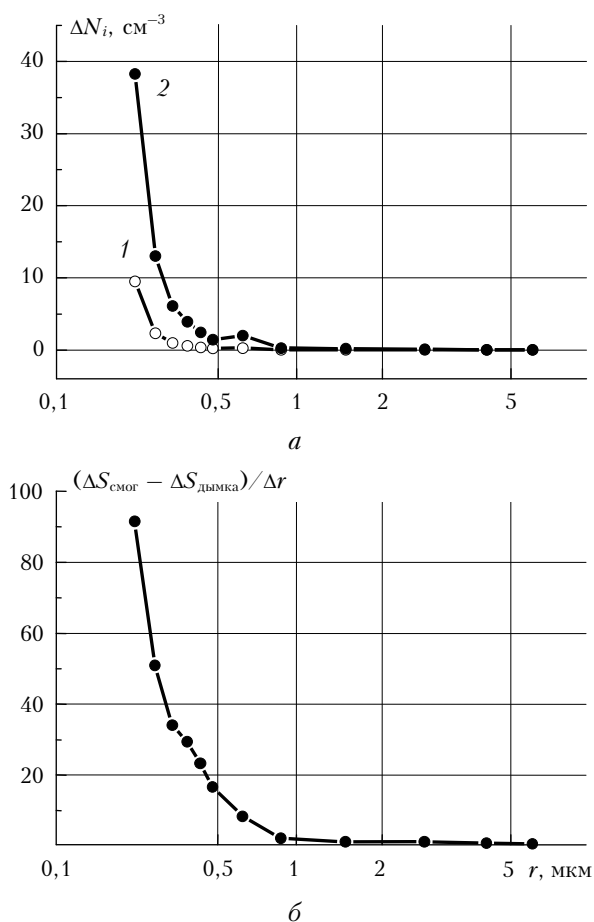


Рис. 6. Дифференциальные счетные концентрации  $\Delta N_i$  для различных размеров аэрозольных частиц в зимней дымке (кривая 1) и в смоговой ситуации (2) (а) и разница между суммарными геометрическими сечениями в различных диапазонах частиц для смоговой ситуации и зимней дымки (б)

На рис. 6, а приведена разница в счетных концентрациях аэрозольных частиц различных диапазонов размеров при максимальном замутнении и в условиях обычной зимней дымки.

Видно, что во время максимума (кривая 2) сильно возросла концентрация самой мелкодисперсной фракции аэрозоля ( $r = 0,20 \div 0,25$  мкм). Для количественной оценки оптического проявления различий в счетной концентрации частиц более адекватной является оценка суммарного геометрического сечения этих частиц, поскольку величина коэффициента аэрозольного рассеяния и его спектральный ход определяются функцией распределения геометрического сечения частиц  $\pi r_i^2 \Delta N_i / \Delta r_i = \Delta S_i / \Delta r_i$  и фактором эффективности рассеяния. Поэтому нами были рассчитаны значения отношений  $\Delta S_i / \Delta r_i$  для различных диапазонов частиц при максимальном замутнении и в условиях обычной зимней дымки и вычислена разница в геометрических сечениях для этих ситуа-

ций. Результаты расчета представлены на рис. 6, б. Видно, что во время максимума замутнения суммарное сечение аэрозольных частиц практически на два порядка превышает сечение частиц в случае зимней дымки.

Таким образом, по совокупности полученных нами данных по спектральной структуре коэффициентов аэрозольного ослабления, по концентрации мелкодисперсного аэрозоля, по концентрации угарного газа и сажевого аэрозоля можно сделать вывод о том, что систематически возникающие в городах плотные зимние дымки (при видимости  $\leq 4$  км) являются, по сути, зимним городским смогом.

## 2. Взаимное влияние оптических и электрических параметров атмосферы

Как указывалось выше, атмосфера приземного слоя представляет собой слабоионизованную аэрозольно-газовую среду, находящуюся в электрическом поле Земли. Последнее предопределяет статистическую взаимосвязь между вариациями  $\beta(\lambda)$  и напряженностью электрического поля. Заметим, что влияние  $\beta(\lambda)$  на величину напряженности электрического поля в атмосферных дымках физически понятно и связано с изменением концентрации аэроионов при их стоке на аэрозоль. Действительно, с ростом концентрации аэрозольных частиц уменьшается концентрация ионов в воздухе за счет их стока на аэрозоль и, соответственно, растет напряженность атмосферного электрического поля, и наоборот. Кстати, именно на этом механизме основано известное электрооптическое соотношение Имянитова—Шифрина, связывающее напряженность поля с метеорологической дальностью видимости [1]. В то же время остается неясным вопрос, каким образом атмосферное электричество может влиять на оптические свойства атмосферы приземного слоя.

С этой целью нами был проведен сравнительный анализ временной изменчивости коэффициента аэрозольного ослабления  $\beta(0,45)$  и напряженности атмосферного электрического поля  $E$  за период с 15 по 31 декабря (рис. 7).

Видно, что во временном ходе оба параметра имеют достаточно хорошо выраженные максимумы, вероятней всего связанные с формированием смоговой ситуации в регионе. Однако обращает на себя внимание то обстоятельство, что напряженность поля в данном эпизоде начала возрастать 17 декабря, в то время как заметный рост коэффициента  $\beta(0,45)$  начался только 20 декабря, т.е. примерно на 3 дня позже.

Так как рост напряженности атмосферного электрического поля однозначно связан с уменьшением концентрации аэроионов в воздухе, то для физической интерпретации обнаруженного временного сдвига параметров  $\beta(0,45)$  и  $E$  можно предположить, что образование зимнего смога начинается с роста концентрации мелкодисперсных частиц, которые еще практически не участвуют в процессе рассеяния света, но уже активно служат стоком для аэроионов.

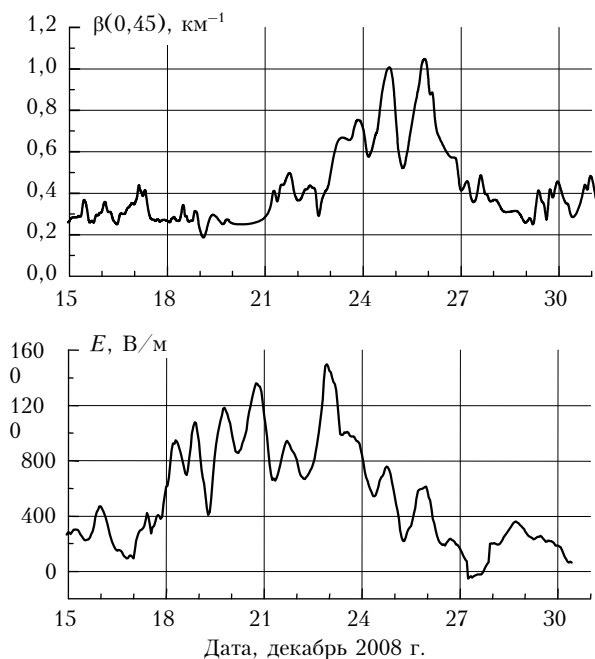


Рис. 7. Сглаженные временные ходы коэффициента аэрозольного ослабления  $\beta(0,45)$  и напряженности атмосферного электрического поля  $E$

Уменьшение концентрации аэроионов в воздухе сразу приводит к росту напряженности поля. В свою очередь, микродисперсные частицы, получившие заряд вследствие диффузии ионов [14], эффективно растут за счет процессов коагуляции и через 2–3 дня, находясь в поле повышенной влажности воздуха (~90%), переходят в диапазон оптически активных частиц, значительно увеличивая замутненность атмосферы. Заметим, что аналогичный эффект в зимнем смоге отмечался ранее в нашей работе [7].

Предложенная схема физической интерпретации, объясняющая сдвиг по временной оси параметров  $\beta(0,45)$  и  $E$ , позволяет заключить, что не только концентрация аэрозоля влияет на напряженность атмосферного электрического поля, но и поле через диффузионный механизм заряда микродисперсного аэрозоля влияет на оптические свойства атмосферы.

### Заключение

В результате проведенных исследований показано, что наблюдаемые в городах плотные зимние дымки (при видимости  $\leq 4$  км), возникающие в штелевых условиях, по совокупности признаков, включающих в себя спектральную структуру коэффициентов аэрозольного ослабления, концентрацию мелкодисперсного аэрозоля, концентрацию угарного газа и сажевого аэрозоля, могут быть идентифицированы как городской зимний смог.

На основе сравнительного анализа временного хода коэффициента аэрозольного ослабления  $\beta(0,45)$  и напряженности атмосферного электрического поля  $E$  в зимний период выявлено, что оба параметра имеют достаточно выраженные максимумы, связанные с формированием смоговой ситуации, но сдвиг

нудые по временной оси. Предложена предварительная физическая гипотеза, позволяющая заключить, что напряженность атмосферного электрического поля через диффузионный механизм заряда микродисперсного аэрозоля влияет на оптические свойства атмосферы.

Сделано предположение, что рост напряженности электрического поля в зимних дымках может служить предвестником образования смоговой ситуации, при которой существенно ухудшаются условия видимости, а также качество воздуха, отрицательно влияющего на здоровье людей.

В заключение заметим, что используемый нами подход, основанный на сравнительном анализе временного хода оптических, микроструктурных и электрических параметров атмосферы, дополненных измерениями концентрации СО, может быть полезен для интерпретации временной изменчивости оптико-микрофизических параметров аэрозоля, полученных из долговременных натуральных измерений. К числу таковых можно отнести работу [15], где рассматриваются особенности внутригодовой изменчивости массовой концентрации субмикронного аэрозоля за 19 лет непрерывных измерений. В работе [16] при проведении дымовых экспериментов в аэрозольной камере была обнаружена диэлектрическая неоднородность дымовых частиц, которая может привести к несферичности дымовых частиц и их преимущественной ориентации. Предположительно авторы связывают это с повышенной концентрацией аэроионов и изменениями напряженности электрических полей. Синхронные измерения оптических параметров и напряженности электрического поля в этих экспериментах позволили бы более определенно интерпретировать выявленную особенность.

Авторы приносят искреннюю благодарность Б.Д. Белану с сотрудниками за предоставленные данные, полученные на постоянно действующей ТОР-станции ИОА СО РАН.

1. *Имянитов И.М., Шифрин К.С.* Современное состояние исследований атмосферного электричества // Успехи физ. наук. 1962. Т. 76, № 4. С. 593–641.
2. *Смирнов В.В.* Электрические факторы чистоты воздуха // Труды ИЭМ. 1983. Вып. 30 (104). С. 64–106.
3. *Анисимов С.В., Мареев Е.А.* Аэроэлектрические структуры в атмосфере // Докл. РАН. 2000. Т. 37, № 1. С. 101–104.
4. *Пхалагов Ю.А., Ужегов 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.
5. *Пхалагов Ю.А., Ужегов В.Н., Ипполитов 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.
6. *Пхалагов Ю.А., Ужегов В.Н., Панченко М.В., Ипполитов И.И.* Электрооптические связи в атмосфере в условиях дымового смога // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19, № 10. С. 861–864.
7. *Пхалагов Ю.А., Ипполитов И.И., Нагорский П.М., Одищев С.Л., Панченко М.В., Смирнов С.В., Уже-*

- гов В.Н. Связь аномальных атмосферных условий с изменчивостью электрического поля // Оптика атмосфер. и океана. 2009. Т. 22, № 1. С. 25–30.
8. Пхалагов Ю.А., Ужегов В.Н., Щелканов Н.Н. Автоматизированный многоволновой измеритель спектральной прозрачности приземной атмосферы // Оптика атмосфер. и океана. 1992. Т. 5, № 6. С. 667–671.
  9. Пхалагов Ю.А., Ужегов В.Н. Статистический метод разделения коэффициентов общего ослабления ИК-радиации на компоненты // Оптика атмосфер. 1988. Т. 1, № 10. С. 3–11.
  10. Щелканов Н.Н. Обобщенный метод построения линейной регрессии и его применение для построения однопараметрических моделей аэрозольного ослабления // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18, № 1–2. С. 86–90.
  11. Ужегов В.Н., Пхалагов Ю.А., Щелканов Н.Н. Исследование аэрозольного ослабления оптического излучения в зимних условиях // Оптика атмосфер. и океана. 1994. Т. 7, № 8. С. 1072–1079.
  12. Филиппов В.Л., Иванов В.П., Колобов Н.В. Динамика оптической погоды. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1986. 157 с.
  13. [http://www.glossary.ru/cgi-bin/gl\\_sch2.cgi?RRsuj](http://www.glossary.ru/cgi-bin/gl_sch2.cgi?RRsuj)
  14. Красногорская Н.В. Электричество нижних слоев атмосферы и методы его измерения. Л.: Гидрометеоздат, 1972. 323 с.
  15. Исаков А.А. О внутригодовой изменчивости массовой концентрации субмикронного приземного аэрозоля в Подмоскowie // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 6. С. 462–465.
  16. Рахимов Р.Ф., Макиенко Э.В., Шмаргунов В.П. Вариации оптических постоянных и спектра размеров дымовых аэрозолей, образованных при термическом разложении разносортных древесных материалов // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 4. С. 248–258.

*Yu.A. Pkhalagov, V.N. Uzhegov, V.V. Polkin, V.S. Kozlov, I.I. Ippolitov, P.M. Nagorsky. Investigations of variability and correlation of optical and electrical characteristics of the atmosphere in winter.*

Comprehensive field investigations of variability and correlation of optical and electrical characteristics of the near-ground atmosphere in winter are carried out. It is shown that, according to the set of parameters, the dense winter hazes observed over cities under calm conditions can be identified as the urban winter smog. Comparative analysis of the temporal variability of the aerosol extinction coefficient and the strength of electric field in winter has show that atmospheric electricity affects the optical properties of the atmosphere through the diffuse mechanism of charge. It is supposed that increase of the strength of electric field in winter hazes under calm conditions can be a predictor of smog formation.