

Оптический измеритель экологически-значимых параметров городских аэрозолей

С.А. Лысенко, М.М. Кугейко

Belarusian State University, 220030 Minsk, Belarus

e-mails: lisenko@bsu.by, kugeiko@bsu.by

Рассматривается методика измерения массовых концентраций $PM_{2,5}$ и PM_{10} городских и фоновых аэрозолей, основанная на последовательной регистрации излучения полупроводниковых лазерных источников (0,41 и 0,98 мкм), рассеянного под углом 90° в двух пространственно разнесенных точках среды. Методика использует установленную для широкого класса атмосферных аэрозолей тесную множественную корреляцию между спектральными значениями объемного коэффициента ослабления и концентрацией частиц респираторной фракции аэрозоля. Достоверность регрессионной связи подтверждается путем ее применения к массиву расчетных оптических характеристик аэрозолей, соответствующих различным типам воздушных масс (полярный, континентальный тропический, умеренный воздух) и различной относительной влажности воздуха.

Ключевые слова. Аэрозоль, массовая концентрация, респираторная фракция, оптический измеритель, экологический мониторинг.

1. Введение

Аэрозольное загрязнение атмосферного воздуха в мегаполисах в настоящее время рассматривается как один из важнейших экологически факторов. Исследования концентрации аэрозолей в городах и сельской местности в течение примерно 10 последних лет показали значимую корреляцию между содержанием в воздухе частиц индустриального происхождения и повышением смертности среди пожилых людей, хронических больных, а также ухудшением состояния пациентов с респираторными заболеваниями. В атмосферной экологии определены две границы отделения респираторной фракции от общей массы аэрозоля – $PM_{2,5}$ и PM_{10} , соответствующие ограничению по верхнему размеру частиц 2,5 и 10 мкм. Измерения массовых концентраций данных фракций позволяют судить о влиянии аэрозоля на всю дыхательную систему человека, а также на ту ее часть, которая непосредственно связана с кислородным обменом и с поступлением вредных веществ в кровь. Поэтому проблемы метрологического обеспечения инструментальных измерений массовой концентрации респираторной фракции аэрозоля являются весьма актуальными.

2. Методика определения концентрации респираторной фракции аэрозоля

Как было показано в работе [1], регрессионный подход к решению обратных задач по интерпретации данных оптических аэрозольных измерений позволяет эффективно определять интегральные микрофизические параметры рассеивающих сред без использования априорной информации. Суть подхода заключается в расчете микрофизических параметров аэродисперсной среды с использованием уравнений множественной регрессии по значениям наиболее информативных оптических характеристик, соответствующих определенным углам приема рассеянного излучения и/или длинам волн. Выбор соответствующих длин волн и углов приема рассеянного излучения основан на анализе спектральных и угловых зависимостей коэффициентов корреляции между измеряемыми оптическими и определяемыми микрофизическими характеристиками. Данные зависимости могут быть получены при наличии достаточного большого объема экспериментальных данных по одновременным оптическим и микрофизическим измерениям. Однако комплекс оптических измерений всегда ограничен по спек-

тральному диапазону, углам наблюдений и практически никогда не наблюдается полного соответствия оптических и микрофизических данных.

Другой подход основывается на экспериментальных сведениях о возможных реальных вариациях микрофизических параметров частиц и последующем расчете необходимых оптических характеристик с “отсеиванием” тех реализаций, которые соответствуют не встречающимся в действительности значениям расчетных оптических и интегральных микрофизических параметров среды. Преимуществом такого подхода является возможность получения расчетных данных практически обо всех необходимых оптических параметрах аэрозоля в любом заданном спектральном диапазоне. В работе [1] описана статистическая микрофизическая модель городского и фоновых аэрозолей, содержащая все необходимые для расчетов оптических характеристик микрофизические параметры аэрозоля, диапазоны и модель их вариаций. Ниже данная модель используется для получения регрессий между спектральными значениями коэффициента аэрозольного ослабления $\varepsilon(\lambda)$ и объемными концентрациями респираторной фракции аэрозоля $H_{2,5}$ и H_{10} , связанными с соответствующими стандартами по массовой концентрации соотношением $PM_X = \bar{\rho} \cdot H_X$, где $\bar{\rho}$ – средняя плотность аэрозольного вещества.

На рис. 1 представлены спектральные зависимости коэффициентов парной корреляции между $\varepsilon(\lambda)$ и $H_{2,5}$, H_{10} и средние погрешности определения концентраций по измерению коэффициента ослабления на одной длине волны. Видно, что длины волн, соответствующие минимальным погрешностям определения $H_{2,5}$ и H_{10} , разнесены по спектру. Для наиболее точного определения $H_{2,5}$ следует использовать излучение в диапазоне 0,3–0,7 мкм (как видно из рис. 1 б, погрешность определения $H_{2,5}$ в этом диапазоне остается практически постоянной и равной примерно 20 %), для H_{10} наиболее эффективная длина волны – 1,1 мкм.

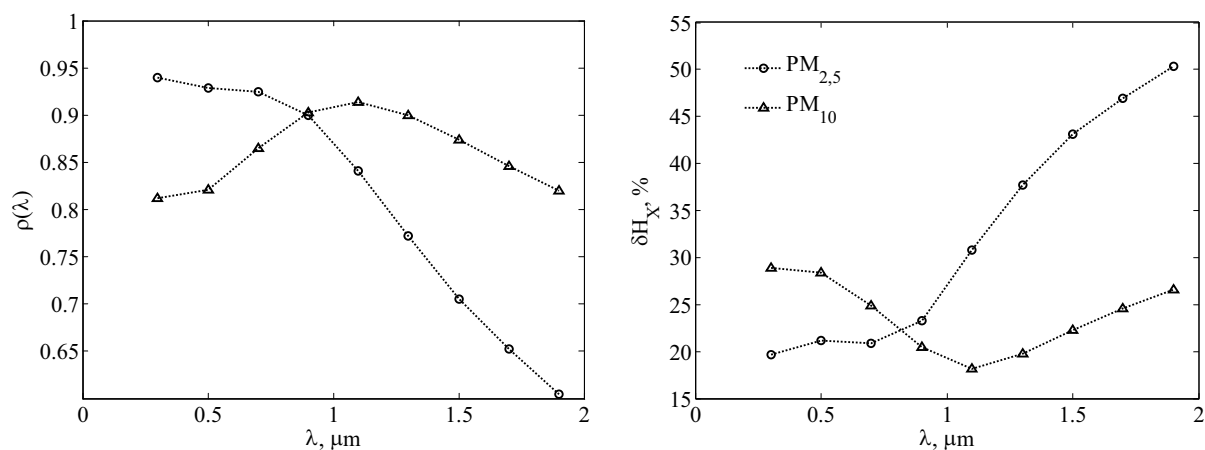


Рис. 1. Спектральные зависимости коэффициентов парной корреляции между $\varepsilon(\lambda)$ и $H_{2,5}$, H_{10} и соответствующих средних погрешностей определения концентраций.

Точность определения концентраций можно повысить при использовании многоволновых измерений $\varepsilon(\lambda)$ и соответствующих им уравнений множественной регрессии:

$$\ln H_X = a_{X0} + \sum_{k=1}^N a_{Xk} \cdot \ln[\varepsilon(\lambda_k)]. \quad (1)$$

При этом необходимо учитывать, что устойчивость уравнений (1) к погрешностям измерения $\varepsilon(\lambda)$ тем больше, чем менее коррелированы друг с другом спектральные

значения измеряемых оптических характеристик. Как показывает проведенный численный анализ погрешностей определения концентраций при 10 %-х погрешностях измерения $\epsilon(\lambda)$, уравнения (1) обладают наибольшей устойчивостью при $N = 2$ (двухволновые измерения).

Таким образом, исходя из вышеизложенного, выбраны длины волн 0,41 и 0,98 мкм. Длины волн также обусловлены практическими соображениями – наличием эффективных полупроводниковых лазерных источников. Получены регрессионные соотношения вида (1), позволяющие производить восстановление концентраций $H_{2,5}$ и H_{10} по измерениям коэффициента аэрозольного ослабления на указанных длинах волн.

На рис. 2 представлены результаты восстановления концентраций $H_{2,5}$ и H_{10} для 1000 реализаций параметров статистической модели аэрозоля при наложении на расчетные значения $\epsilon(\lambda_k)$ случайных погрешностей в пределах 10 %. Средние погрешности восстановления $H_{2,5}$ и H_{10} составляют примерно 14 и 18 %, что, ввиду широких диапазонов их возможных значений (в два порядка), является вполне приемлемым для удовлетворения потребностей ряда задач экологического мониторинга окружающей среды (например, по превышению ПДК).

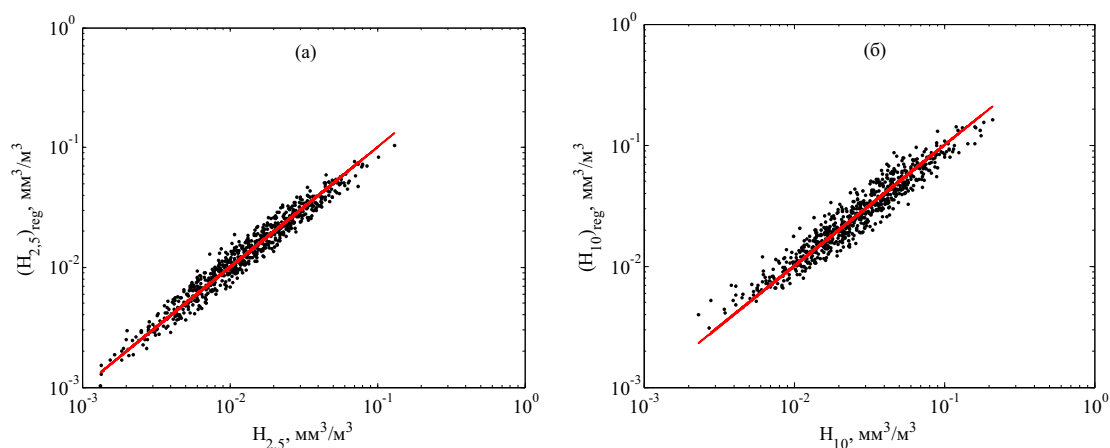


Рис. 2. Результаты сопоставления точных (модельных) и восстановленных с использованием уравнений регрессии значений $H_{2,5}$ (а) и H_{10} (б) при 10 %-х погрешностях измерения $\epsilon(\lambda_k)$.

Следует отметить, что диапазоны вариаций микрофизических параметров аэрозолей, при которых справедливы полученные уравнения регрессии, соответствуют широкому классу атмосферных ситуаций и типам воздушных масс. В подтверждение к сказанному на рис. 3 представлены результаты восстановления $H_{2,5}$ и H_{10} с использованием уравнений регрессии, по значениям $\epsilon(\lambda_k)$, соответствующим трем аэрозольным моделям из [2], описывающим дисперсный состав: 1 – континентального арктического воздуха, очагами формирования которого являются Северный ледовитый океан и северное побережье материка; 2 – тропического воздуха, районом формирования которого является степная зона; 3 – сухого пылевого помутнения в приземном слое (мгла), наблюдаемого в южных степных районах. Различные точки для одной и той же модели соответствуют значениям относительной влажности воздуха от 20 до 99,5 %. Хорошее совпадение точных и восстановленных значений $H_{2,5}$ и H_{10} свидетельствует об общности и универсальности полученных уравнений регрессии.

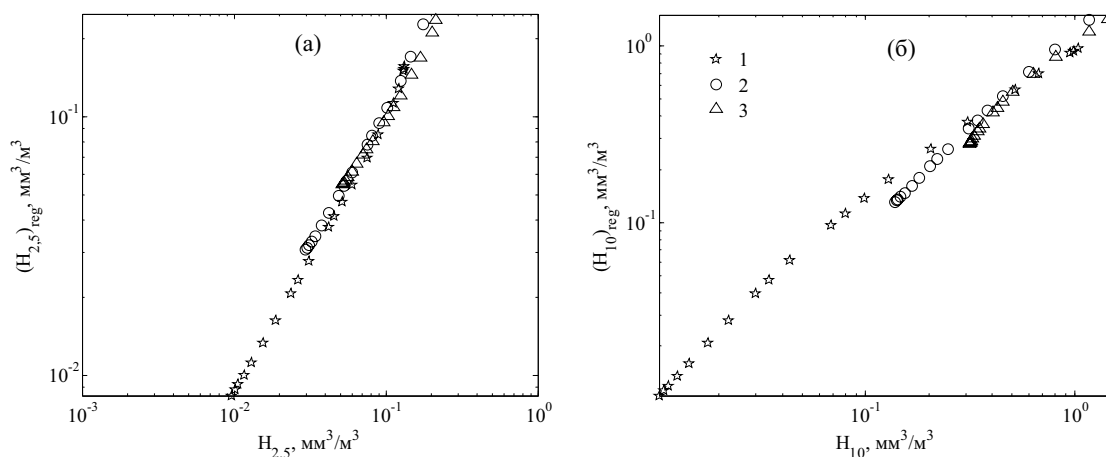


Рис. 3. Результаты сопоставления точных (модельных) и восстановленных с использованием уравнений регрессии концентраций $H_{2,5}$ (а) и H_{10} (б), для трех аэрозольных моделей.

3. Двухлучевой нефелометрический метод определения оптической толщины рассеивающих сред

Традиционные измерители оптической толщины (базовые фотометры) обладают существенным недостатком, связанным с тем, что на приемнике регистрируется весь световой поток большой интенсивности, приходящий напрямую от излучателя, что влечет за собой высокий уровень дробовых шумов в фотоприемнике, на фоне которых весьма затруднительно обнаружить изменение сигнала, вызванное ослаблением на трассе. В качестве альтернативы такому методу служит двухлучевой нефелометрический метод, основанный на последовательной регистрации излучения двух полупроводниковых лазерных источников, рассеянного под углом 90° в двух пространственно разнесенных точках среды. Данный метод, подробно изложенный в [3], снимает проблему с высоким уровнем дробовых шумов фотоприемника, позволяет проводить измерения при меньшей измерительной базе. Кроме того, измеритель оптической толщины, основанный на данном методе, является устойчивым к изменениям аппаратных констант, нестабильности оптико-электронного тракта и загрязнению оптики.

4. Заключение

Таким образом, можно заключить, что предлагаемая методика определения концентрации респираторной фракции аэрозоля, не требует использования априорной информации и обеспечивает погрешность измерения $\approx 15\%$. Наиболее же приемлемым в плане точности измерения и эксплуатационной надежности является сочетание предложенного способа измерения оптической толщины аэрозоля с алгоритмом обработки (1). В связи с чем, система на предлагаемой основе в метрологическом плане может являться образцовой.

Литература

1. Кугейко М.М., Лысенко С.А. Опт. и спектр. 2008. Т. 105, № 1. С. 160.
2. Иванов В.П. Прикладная оптика атмосферы в тепловидении. Казань: Новое Знание, 2000.
3. Кугейко М.М. Лазерные системы (в условиях априорной неопределенности). Мн.: БГУ, 1999.