

Таким образом, пользовательский интерфейс реализован интуитивно понятным и простым. Для работы с программой никаких дополнительных знаний не требуется.

Заключение

Разработано программное средство, позволяющее еще на ранней стадии проектирования выполнить оценку теплового режима средства медицинской электроники. В дальнейшем данные результаты будут учтены разработчиками, что позволит значительно снизить себестоимость продукции.

Список литературы

1. Роткоп, Л.Л. Обеспечение тепловых режимов при конструировании РЭА / Л.Л. Роткоп, Ю.Е. Спокойный – М. : Советское радио, 1976. – 232 с.
2. Молодечкина, Т.В. Физические основы проектирования радиоэлектронных средств : учеб.-метод. комплекс для студентов специальности 1-39 02 01 «Моделирование и компьютерное проектирование РЭС». В 2 ч. Ч. 1. / Т.В. Молодечкина, В.Ф. Алексеев, М.О. Молодечкин. – Новополоцк : ПГУ, 2013. – 204 с. – Новополоцк : ПГУ, 2013. – 204 с.
3. Молодечкина, Т.В. Физические основы проектирования радиоэлектронных средств : учеб.-метод. комплекс для студентов специальности 1-39 02 01 «Моделирование и компьютерное проектирование РЭС». В 2 ч. Ч. 2. / Т.В. Молодечкина, В.Ф. Алексеев, М.О. Молодечкин. – Новополоцк : ПГУ, 2013. – 204 с. – Новополоцк : ПГУ, 2013. – 224 с.
4. Конструирование и технология электронных систем : пособие к курсовому проектированию для студ. спец. «Электронно-оптические системы и технологии» всех форм обуч. / А.А. Костюкевич, В.М. Бондарик, А.П. Достанко, В.Ф.Алексеев. – Минск : БГУИР, 2011. – 119 с.
5. Физические основы проектирования радиоэлектронных средств. Лабораторный практикум. В 2 ч. Ч. 2 : Исследование физических процессов в конструкциях РЭС : пособие / В. Ф. Алексеев, Г. А. Пискун, И. Н. Богатко. – Минск : БГУИР, 2017. – 74 с. : ил.
6. Программное обеспечение инженерного моделирования физических процессов. Лабораторный практикум. В 2 ч. Ч. 1 : Тепловые режимы работы и защиты конструкций РЭС от механических воздействий : пособие / В. Ф. Алексеев, И. Н. Богатко, Г. А. Пискун. – Минск : БГУИР, 2017. – 124 с.

УДК 551.508

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАССОВЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ АЭРОЗОЛЕЙ

М.М.КУТЕЙКО¹, С.А. ЛЫСЕНКО²

¹Белорусский государственный университет

²Институт природопользования НАН Б

Разработан способ определения фракционных концентраций атмосферного аэрозоля PM_{10} , $PM_{2,5}$, PM_{10} , $PM_{>10}$ на основе измерения спектральных значений коэффициентов рассеяния под углами. Оценена эффективность и точностные характеристики предлагаемого метода. Показана возможность создания простого экспресс-анализатора аэрозольных загрязнений окружающей среды, возможности создания автоматизированной системы непрерывного мониторинга городского воздуха, воздуха в помещениях

Ключевые слова: атмосферный аэрозоль, микрофизические параметры аэрозоля, оптические характеристики, регрессионные соотношения.

Введение

В настоящее время вопросы экологии остро стоят перед жителями всех крупных городов и районов с развитой промышленной деятельностью и интенсивным автотранспортным движением. Результаты многочисленных эпидемиологических исследований однозначно указывают на взаимосвязь загрязнения воздуха с уровнем сердечнососудистых и респираторных заболеваний у населения. Серьезную угрозу для здоровья человека представляют взвешенные в воздухе аэрозольные частицы и в первую очередь мелкодисперсные (респирабельные) частицы, способные глубоко проникать в органы дыхательной системы человека и накапливаться в легких (вливая тем самым на поступление вредных веществ в кровь). Согласно Американским и Европейским стандартам по качеству атмосферного воздуха в качестве индикаторов респирабельных частиц используются массовые концентрации PM_x частиц с аэродинамическим диаметром $x \leq X$, где $X = 1,0; 2,5$ и 10 мкм.

Ниже рассмотрено решение задачи повышения точности определения концентрации аэрозоля и расширение функциональных возможностей способа за счет определения массовой концентрации аэрозоля в широком диапазоне его физико-химических свойств с разделением на фракции PM_1 , $PM_{2.5}$, PM_{10} и $PM_{>10}$.

Способ определения массовых концентраций аэрозолей [1]

Хорошо известно, что вклады частиц разных размеров в суммарную интенсивность рассеянного ими света различаются в зависимости от угла рассеяния θ . Крупные частицы определяют рассеяние под малыми углами ($\theta \leq 5^\circ$), тогда как в боковом рассеянии ($\theta = 15-45^\circ$) преобладает вклад более мелких частиц. Поэтому, регистрируя свет, рассеянный под разными углами, можно выполнять анализа фракционного состава аэрозоля. Кроме того точность анализа может быть повышена за счет оптимального выбора длины волны света, поскольку наибольшая эффективность рассеяния света соответствует частицам, размер которых близок к длине волны падающего на них излучения.

В связи с вышесказанным для определения концентраций аэрозольных фракций предлагается использовать следующую схему измерений. В измерительный объем последовательно посылается излучение с длинами волн $\lambda_1 \leq 0,55$ мкм и $\lambda_2 \geq 1,0$ мкм, информативными относительно мелкодисперсных и грубодисперсных аэрозольных фракций соответственно. Рассеянный свет улавливается фотоэлементами, установленными под углами $\theta_1 \leq 5^\circ$ и $15^\circ \leq \theta_2 \leq 45^\circ$ к падающему лучу. По детектируемым сигналам определяются коэффициенты аэрозольного светорассеяния $\beta(\lambda_i, \theta_j)$, где $i = 1, 2$ и $j = 1, 2$. Массовые концентрации PM_1 , $PM_{2.5}$, PM_{10} и $PM_{>10}$ рассчитываются путем решения обратной задачи по интерпретации коэффициентов $\beta(\lambda_i, \theta_j)$.

В данном случае коэффициенты $\beta(\lambda_i, \theta_j)$ содержат как спектральную, так и пространственную составляющие информации и не допускают простой одномерной интерпретации, поэтому для удобства их анализа необходимо получить более однородную структуру данных. Значения $\ln \beta(\lambda_i, \theta_j)$ можно рассматривать как компоненты вектора измерений \mathbf{b} . Разложим \mathbf{b} по системе собственных векторов \mathbf{v}_n ($n = 1, \dots, 4$) его ковариационной матрицы, образующих ортогональный базис. Коэффициенты этого разложения ξ_n (линейно-независимые компоненты) любой случайной реализации \mathbf{b} находятся по формуле:

$$\xi_n = \mathbf{v}_n \cdot (\mathbf{b} - \bar{\mathbf{b}}), \quad (1)$$

где $\bar{\mathbf{b}}$ – средний вектор измерений с компонентами $\overline{\ln \beta(\lambda_i, \theta_j)}$. Для определения массовых концентраций PM_1 , $PM_{2.5}$, PM_{10} и $PM_{>10}$ можно использовать полиномиальные регрессии вид

$$\ln PM_X = a_{00,X} + \sum_{n=1}^4 \sum_{k=1}^K a_{nk,X} \cdot (\xi_n)^k, \quad (2)$$

где K – степень полинома; $a_{00,X}$ и $a_{nk,X}$ – коэффициенты регрессии, получаемые на основе «обучающего» ансамбля случайных реализаций PM_X и $\beta(\lambda_i, \theta_j)$.

Набор «обучающих» данных, необходимый для нахождения векторов \mathbf{v}_n , $\bar{\mathbf{b}}$ и коэффициентов регрессии (2), сформирован на основе модели городского (или индустриального) аэрозоля, принятой Всемирной метеорологической организацией (WMO). В рассматриваемой модели форма частиц аэрозоля предполагается сферической, а их внутренняя структура – однородной. Это с одной стороны связано с известными трудностями решения задач дифракции электромагнитного излучения на неоднородных и несферических частицах и ограниченной областью применимости получаемых решений. С другой для определения концентраций рассматриваемых фракций аэрозоля вполне можно ограничиться измерениями интенсивности рассеянного света в области углов $\theta \leq 20^\circ$, в которой индикатриса аэрозольного светорассеяния слабо зависит от структуры и формы рассеивающих частиц.

На основе описанной выше модели сформирован ансамбль из 10^3 случайных реализаций PM_X и $\beta(\lambda, \theta)$, где $\theta = 1-180^\circ$, $\lambda = 0,355; 0,532; 1,064; 1,25; 1,56; 1,67$ и $2,14$ мкм. Выбранный набор длин волн обусловлен необходимостью проведения нефелометрических измерений аэрозоля в окнах прозрачности атмосферы, соответствующих минимальному поглощению света газовыми составляющими атмосферы. Кроме того значения $\lambda = 0,355; 0,532; 1,064$ мкм соответствуют коммерчески-доступным и высоко эффективным лазерным источникам излучения.

С целью оптимизации измерений аэрозольного светорассеяния рассмотрим корреляции между PM_X и $\beta(\lambda, \theta)$. Анализ спектрально-угловой зависимости коэффициента парной корреляции $\rho_1(\lambda, \theta)$ между массовой концентрацией мелкодисперсных частиц PM_1 и $\beta(\lambda, \theta)$ показывает, что $\rho_1(\lambda, \theta)$ возрастает с уменьшением λ , причем угол θ , соответствующий максимуму $\rho_1(\lambda, \theta)$, составляет 15° при $\lambda = 0,355$ мкм, 20° при $\lambda = 0,532$ мкм и 40° при $\lambda = 1,064$ мкм. Аналогичный коэффициент корреляции $\rho_{>10}(\lambda, \theta)$ для грубодисперсных частиц ($PM_{>10}$) напротив быстро убывает с уменьшением λ , причем значения θ , соответствующие наибольшей корреляции между $PM_{>10}$ и $\beta(\lambda, \theta)$, при этом локализуются во все более узкой области углов вблизи $\theta = 0^\circ$. Такое качественное поведение коэффициентов $\rho_1(\lambda, \theta)$ и $\rho_{>10}(\lambda, \theta)$ является вполне предсказуемым и объясняется зависимостью $\beta(\lambda, \theta)$ от параметра $\delta = \pi x / \lambda$ и увеличением вытянутости вперед индикатрисы рассеяния частиц с ростом δ . При этом следует иметь в виду, что углы рассеяния менее 5° не представляют практического интереса по причине технической сложности регистрации рассеянного излучения, а также в связи с существенным влиянием дифракции на оптических элементах излучателя. Однако, как видно из расчетов, повысить точность определения $PM_{>10}$ по измерениям аэрозольного светорассеяния в области приемлемых для практики углов можно путем увеличения длины волны зондирующего излучения. Так, при увеличении λ с 1,064 мкм до 2,14 мкм коэффициенты корреляции между $PM_{>10}$ и $\beta(\lambda, 5^\circ)$ увеличивается от 0,80 до 0,97.

Таким образом, для одновременного определения концентраций мелкодисперсных и грубодисперсных частиц аэрозоля, необходимо проводить измерения аэрозольного светорассеяния под углами $\theta_1 = 5^\circ$ и $\theta_2 = 15^\circ$ на длинах волн $\lambda_1 = 0,355$ мкм и $\lambda_2 = 2,14$ мкм, поскольку коэффициенты $\beta(\lambda_1, \theta_2)$ и $\beta(\lambda_2, \theta_1)$ практически однозначно связаны с концентрациями PM_1 и $PM_{>10}$. В тоже время коэффициенты $\beta(\lambda_1, \theta_1)$ и $\beta(\lambda_2, \theta_2)$ тесно коррелируют с массовыми концентрациями других фракций аэрозоля, а именно с $PM_{1-2.5} = PM_{2.5} - PM_1$ и $PM_{2.5-10} = PM_{10} - PM_{2.5}$. Результаты расчетов коэффициентов корреляции $\rho_{1-2.5}(\lambda, \theta)$ и $\rho_{2.5-10}(\lambda, \theta)$, отвечающих этим фракциям, показывают, что максимумы $\rho_{1-2.5}$ и $\rho_{2.5-10}$ примерно соответствуют вышеуказанным значениям λ_i и θ_j . При этом очевидно, что совместная обработка всех четырех коэффициентов $\beta(\lambda_i, \theta_j)$ по формулам (1) и (2) позволит повысить точность определения концентрации каждой фракции по сравнению с использованием парных корреляций. Векторы \mathbf{v}_n , $\bar{\mathbf{b}}$ и коэффициенты регрессии (2), отвечающие оптимальной схеме нефелометрического измерителя PM_X , приведены в табл. 1 и 2 (для размерностей величин PM_X и β , равных соответственно $[мкг/м^3]$ и $[км^{-1}ср^{-1}]$).

Таблица 1. Средние значения и собственные векторы ковариационной матрицы $\ln\beta(\lambda, \theta)$

λ , мкм	θ	$\overline{\ln \beta(\lambda, \theta)}$	\mathbf{v}_1	\mathbf{v}_2	\mathbf{v}_3	\mathbf{v}_4
0,355	5°	-2,3420	0,5145	-0,3677	-0,4636	0,6206
	15°	-3,5399	0,4840	-0,6111	0,4742	-0,4091
2,14	5°	-3,5678	0,4887	0,5801	0,5501	0,3494
	15°	-4,9681	0,5120	0,3936	-0,5075	-0,5704

Погрешности определения PM_X предлагаемым способом оценивались на основе «тестового» ансамбля реализаций PM_X и $\beta(\lambda_i, \theta_j)$, полученного путем наложения на коэффициенты $\beta(\lambda_i, \theta_j)$ из «обучающего» ансамбля случайных отклонений в пределах $\delta\beta$. Для каждой реализации $\beta(\lambda_i, \theta_j)$ из «тестового» ансамбля проводилось восстановление PM_X по формулам (1) и (2). Восстановленные значения массовых концентраций PM_X^* сравнивались с их точными значениями, соответствующими обрабатываемым коэффициентам $\beta(\lambda_i, \theta_j)$. После перебора всех реализаций вычислялись абсолютная (ΔPM_X) и относительная (δPM_X) погрешности восстановления PM_X , а также коэффициент корреляции между заданными и восстановленными значениями PM_X (ρ_X^*). Значения PM_X^* , полученные по формулам (1) и (2) при $\delta\beta = 10\%$, в зависимости от соответствующих известных значений PM_X представлены в таблице 3. Видно, что данные, получаемые на основе рассматриваемых оптических измерений, обладают высокой информативностью, а решение обратной задачи по формулам (1) и (2) является устойчивым к погрешностям оптических измерений.

Следует отметить, что рассмотренная выше схема нефелометрического измерителя PM_X обладает двумя недостатками, касающимися используемых в ней длин волн оптического зондирования. Во-первых, в условиях слабозамутненной атмосферы в оптическом сигнале, детектируемом

на $\lambda_1 = 0,355$ мкм, будет заметно проявляться вклад молекулярного рассеяния. В принципе, учет данного обстоятельства не представляет значительных сложностей, однако требует использования дополнительной априорной информации о температуре и давлении воздуха в месте измерений. Во-вторых, в настоящее время отсутствуют эффективные полупроводниковые и лазерные источники излучения с $\lambda_2 = 2,14$ мкм. Большое количество научных работ, посвященных разработке источников лазерного излучения в ИК области спектра с приемлемыми для практики характеристиками, позволяет надеяться на появление в ближайшем времени серийно выпускаемых источников такого рода. Однако, для того чтобы предлагаемый способ определения PM_x можно было уже сейчас использовать на практике следует рассмотреть возможность его реализации на основе имеющейся элементной базы. Учтем также, что влияние молекулярного рассеяния на детектируемые сигналы можно существенно ослабить сдвигом λ_1 в сторону больших длин волн (по закону Релея коэффициент молекулярного рассеяния убывает с увеличением λ как λ^{-4}).

Таблица 2. Коэффициенты $a_{nk,X}$ уравнений регрессии (2)

n, k	$X, \text{ мкм}$			
	1,0	2,5	10	>10
0, 0	1,4155	1,9910	2,6219	2,2536
1, 1	0,4790	0,5133	0,5051	0,4657
1, 2	0,0000	-0,0002	-0,0002	0,0005
1, 3	-0,0002	-0,0001	-0,0001	0,0000
2, 1	-0,6672	-0,5072	0,0089	0,6720
2, 2	-0,0099	-0,0366	0,0988	0,0141
2, 3	-0,0033	-0,0062	0,0007	0,0024
3, 1	0,6164	-0,3890	-0,0825	1,6109
3, 2	-0,0125	0,2876	0,0981	-0,2215
3, 3	0,4131	0,0348	0,0729	-0,0783
4, 1	-1,2784	0,1001	-0,1774	1,4384
4, 2	-1,0618	-0,2407	-0,2002	-2,0067
4, 3	3,8264	2,9235	2,1516	8,4568

Таблица 3. Оценки точности определения PM_x , соответствующие схеме нефелометрических измерений с $\lambda_1 = 0,355$ мкм, $\lambda_2 = 2,14$ мкм, $\theta_1 = 5^\circ$ и $\theta_2 = 15^\circ$, при погрешностях измерения $\beta(\lambda_i, \theta_j)$, равных $\delta\beta$

$X, \text{ мкм}$	$\delta\beta, \%$	ρ_x^*	$\Delta PM_x, \text{ мкг/м}^3$	$\delta PM_x, \%$
1,0	0	0,9883	4,13	10,8
	10	0,9823	4,98	13,3
2,5	0	0,9919	4,34	7,9
	10	0,9914	4,66	9,2
10	0	0,9947	4,58	5,3
	10	0,9940	5,13	6,1
>10	0	0,9965	2,96	7,6
	10	0,9835	6,59	14,7

Рассмотрим схему нефелометрических измерений, в которой исследуемый объем воздуха освещается излучением с $\lambda_1 = 0,532$ мкм и $\lambda_2 = 1,064$ мкм, а рассеянное излучение регистрируется под углами $\theta_1 = 5^\circ$ и $\theta_2 = 20^\circ$ по отношению к зондирующему лучу. Угол $\theta_2 = 20^\circ$ соответствует максимальной корреляции между PM_1 и $\beta(\lambda, \theta)$ при $\lambda = 0,532$ мкм. Исходя из аналогичной корреляции для $PM_{>10}$, угол θ_1 следовало бы уменьшить по сравнению с рассмотренным выше случаем, однако, как уже отмечалось, это сопряжено с рядом сложностей технического характера. Оценки точности определения PM_x с использованием рассматриваемой схемы измерений, полученные на основании замкнутых численных экспериментов по восстановлению PM_x из $\beta(\lambda_i, \theta_j)$, представлены в табл. 4 Видно, что результаты восстановления $PM_1, PM_{2,5}$ и PM_{10} практически не отличаются от аналогичных результатов для оптимальной схемы нефелометрических измерений. В тоже время точность восстановления $PM_{>10}$ для оптимальных измерений значительно выше.

Таблица 4. Оценки точности определения PM_x , соответствующие схеме нефелометрических измерений с $\lambda_1 = 0,532$ мкм, $\lambda_2 = 1,064$ мкм, $\theta_1 = 5^\circ$ и $\theta_2 = 20^\circ$

X , мкм	$\delta\beta$, %	ρ_x^*	ΔPM_x , мкг/м ³	δPM_x , %
1,0	0	0,9825	4,86	12,4
	10	0,9768	5,75	15,0
2,5	0	0,9888	5,08	9,0
	10	0,9850	5,94	11,0
10	0	0,9930	4,96	5,4
	10	0,9918	6,07	7,3
>10	0	0,9679	8,83	23,2
	10	0,9414	12,8	31,5

Заключение

Таким образом, предлагаемый способ является устойчивым к вариациям микроструктуры и комплексного показателя преломления аэрозоля, повышает точность и расширяет функциональные возможности известных способов за счет возможности определения массовой концентрации аэрозоля с разделением на фракции PM_{10} , $PM_{2,5}$, PM_{10} и $PM_{>10}$. Способ удовлетворяет современным потребностям санитарно-гигиенических и эпидемиологических служб, а массовое производство датчиков, реализующих данный способ, в перспективе позволит построить автоматизированную сеть непрерывного мониторинга загрязнений городского воздуха с выходом всех данных на центральный пульт управления или в Интернет.

Список литературы

1. Лысенко С.А., Кугейко М.М.. Способ определения массовых концентраций аэрозолей Евразийский патент № 026528 от 28.04.2017 г.

УДК 533.9; 621.793.6

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СЕЗОННОСТИ НА ТЕХНОГЕННОЕ И АНТРОПОГЕННОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ БИОСФЕРЫ Г. МИНСКА МЕТАЛЛАМИ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО АТОМНО-ЭМИССИОННОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

ПАТАПОВИЧ М.П., БУЛОЙЧИК Ж.И., МИНЬКО А.А., ЗАЖОГИН А.П.

Белорусский государственный университет

Разработаны аналитические методики лазерного атомно-эмиссионного определения послойного содержания Ca, Al, Ti и Fe в растительных объектах при воздействии на поверхность и объем пористых образцов сдвоенными лазерными импульсами. Исследовано послойное содержание элементов в образцах коры взятых с еловых древостоев в Минске летом и зимой и в Березинском биосферном заповеднике. Показано, что в верхних слоях образцов взятых в центре Минска содержание тяжелых металлов значительно выше, чем в образцах ББЗ.

Ключевые слова: лазерный атомно-эмиссионный спектральный анализ, тяжелые металлы, сдвоенные лазерные импульсы.

The analytical methods have been developed for laser atomic-emission detection of the content of Ca, Al, Ti, and Fe within the layers of plant objects when the surface and volume of porous samples were subjected to the effect of double laser pulses. The elemental content was studied layer-by-layer in the samples of the bark of spruce forest stand in Minsk during the winter and summer periods and also in Berzinski biosphere reserve. It has been demonstrated that in the upper layers of the samples from Minsk the content of heavy metals was considerably higher than that from the reserve.

Key words: laser atomic-emission spectral analysis, heavy metals, double laser pulses.

Введение

Загрязнение окружающей среды тяжелыми металлами является одной из важнейших экологических проблем современности. В условиях техногенеза токсиканты включаются в биогеохимические круговороты, поступают через почву, гидросферу и атмосферу в растения, корма, продукты питания, в организмы животных и человека. Изучение биогеохимического поведения приори-