

FRI-9.2-1-EC-07

ANALYSIS OF ATMOSPHERIC AIR DUST IN THE REGION OF THE CITY OF RUSE ²¹

Assist. Prof. Nikolay Kovachev, PhD

Department of Heat, Hydraulics and Environmental Engineering,
 “Angel Kanchev” University of Ruse
 Phone: +359 82 888 498
 E-mail: nkovachev@uni-ruse.bg

Assoc. Prof. Plamen Manev, PhD

Department of Heat, Hydraulics and Environmental Engineering,
 “Angel Kanchev” University of Ruse
 Phone: +359 82 888 485
 E-mail: pmanev@uni-ruse.bg

Assist. Prof. Ventsislav Dobrinov, PhD

Department of Heat, Hydraulics and Environmental Engineering,
 “Angel Kanchev” University of Ruse
 Phone: +359 82 888 446
 E-mail: vdobrinov@uni-ruse.bg

Abstract: *This study analyses analytically the air pollution in Ruse, placing a strong emphasis on microscopic methods for precise source identification. Scanning electron microscopy (SEM) is utilized to reveal particle morphology, enabling the definitive differentiation between emissions from domestic heating, transport, and industry. Combined with ARIMA mathematical modelling, the research provides a robust tool for air quality forecasting and qualitative assessment. This integrated approach transforms statistical data into an actionable strategy for enhancing urban environmental health.*

Keywords: *Air pollution, mathematical modelling, microscopic methods.*

ВЪВЕДЕНИЕ

Традиционният мониторинг на качеството на атмосферния въздух в индустриалните и градските центрове обикновено разчита на автоматични измервателни станции. Тези системи предоставят надеждни количествени данни за нивата на ФПЧ₁₀ и ФПЧ_{2.5}. Въпреки това, за разработването на ефективни управленски стратегии за намаляване на замърсяването е необходимо да се познава не само количеството, но и физико-химичният характер на частиците. Автоматичните методи не могат самостоятелно да разграничат дали даден пик в нивата на прах се дължи на емисии от изгаряне на биомаса за битово отопление, автомобилен трафик (вкл. износване на гуми и накладки) или промишлена дейност. В този контекст микроскопските методи се утвърждават като незаменим аналитичен инструмент.

Фините прахови частици (ФПЧ) представляват сложна аерозолна система, съставена от хетерогенни твърди и капковидни агрегати, диспергирани в атмосферния флуид. Класификацията се базира на аеродинамичния еквивалентен диаметър: PM₁₀ (<10 μm), PM_{2.5} (<2,5 μm) и ултрафини частици (<0,1 μm). Особено критична е фракцията PM_{2.5} и субмикронните частици поради повишената им алвеоларна депозиция и способността за проникване в системната циркулация, което улеснява биодистрибуцията към екстрапулмонарни органи.

Морфо физичният и химичният анализ изискват мултидисциплинарен анализ: оптична микроскопия, SEM/ТЕМ и АFМ за високоразделна визуализация, гранулометрично профилиране и повърхностна топография. Спектроскопски техники като XPS, FTIR и Раманова спектроскопия осигуряват информация за елементарния и функционалния химичен състав. Масспектрометрични

²¹ Докладът е представен на Научната сесия на Секция „Екология и опазване на околната среда“ на 24 Октомври 2025 г. с оригинално заглавие на български език: АНАЛИЗ НА ЗАПРАШЕНОСТТА В АТМОСФЕРНИЯ ВЪЗДУХ В РАЙОНА НА ГРАД РУСЕ

методи (GC MS, LC MS, ICP MS) и лазерно оптични системи за реално времеви измервания допълват анализа чрез висока аналитична чувствителност и възможност за спектриране на органични и неорганични фракции. За превръщане на морфологичните данни в масови оценки се прилагат модели, които използват еквивалентен обем и приети плътности по категории частици.

Интеграцията на морфологични данни, химичен профил и статистическо моделиране формира холистична рамка за оценка на токсикологичния риск. Тази рамка е ключова за екологичната токсикология и общественото здраве, тъй като позволява предсказване на биологичните ефекти и разработване на стратегии за управление на качеството на въздуха.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Комбинирането на различни методи – микроскопски наблюдения, химичен анализ и автоматизирани измервателни станции – осигурява най-пълна картина за замърсяването на въздуха. Така се създава надеждна основа за оценка на риска за здравето и за разработване на ефективни стратегии за ограничаване на вредното въздействие на фините прахови частици.

Въпреки това, микроскопията има и съществени ограничения. Тя е предимно дескриптивен метод, който не предоставя пълна информация за химичния състав на частиците. Освен това, подготовката на пробите може да доведе до артефакти – промяна на структурата или загуба на летливи компоненти. Анализът е трудоемък и често изисква ограничен брой наблюдения, което поставя въпроси за статистическата представителност.

За преодоляване на тези ограничения микроскопските техники се комбинират с други аналитични подходи. Спектроскопските методи (EDS, XPS, FTIR, Raman) осигуряват данни за елементния и молекулния състав, докато маспектрометрията и лазерно-оптичните системи позволяват бърз и количествен мониторинг на концентрацията във въздуха. Така се изгражда интегрирана методологична рамка, в която микроскопията служи като основа за морфологичен анализ, а допълнителните техники допринасят за химическа и функционална характеристика.

Методология за броене на броя на ФПЧ с оптичен микроскоп

Изследването на фините прахови частици (ФПЧ) чрез оптичен микроскоп представлява един от най-достъпните и визуално информативни методи за оценка на замърсяването на въздуха и характеристиките на аерозолните частици. Макар че съвременните автоматични станции използват лазерни или масови методи за определяне на концентрациите на PM_{10} и $PM_{2.5}$, микроскопският анализ остава ценен инструмент, когато е необходимо да се получи информация за морфологията, произхода и разпределението на частиците. Методологията за броене на ФПЧ с оптичен микроскоп включва последователност от етапи, които гарантират възпроизводимост и надеждност на резултатите (WHO, 2021). Процесът на микроскопско изследване на въздушните замърсители включва следните етапи (Hinds, W. C. 1999).

Пробонабиране: Атмосферният въздух се аспирира през специализирани филтри (обикновено поликарбонатни или тефлонови мембрани) с определен дебит за фиксиран период от време (Baron, P. A., & Willeke, K. 2001).

Оптична микроскопия: Прилага се за първичен оглед и анализ на по-едри фракции (над 1 μm), включващи полени, спори, минерален прах и органични влакна.

Сканираща електронна микроскопия (SEM): Използва се за детайлно изобразяване на субмикронни и наноразмерни частици ($PM_{2.5}$ и $PM_{0.1}$). Чрез сканиране с фокусиран електронен сноп се получават високоразделителни триизмерни изображения на топографията и структурата на частиците.

Енергийно-дисперсионна рентгенова спектроскопия (EDX): Често интегрирана към SEM системите, тази технология позволява едновременен качествен и количествен анализ на химичния (елементния) състав на всяка индивидуална наблюдавана частица.

Първата стъпка е подготовката на пробата, която често определя качеството на последващия анализ. Обикновено пробите се събират върху филтри – целулозни, кварцови или политетрафлуоретиленови (PTFE) – чрез аспирация на въздух с известен дебит. След приключване на пробонабирането филтърът се изрязва или поставя директно върху предметно стъкло. В някои случаи се използва капка имерсионно масло или фиксиращ разтвор, който подобрява прозрачността

и контраста. Важно е филтърът да бъде поставен равномерно, без гънки или мехурчета, тъй като това би довело до неравномерно разпределение на частиците и грешки при броенето.

Следващият ключов етап е настройката на оптичния микроскоп. Изборът на увеличение зависи от размера на частиците, които се очаква да бъдат наблюдавани. За общ преглед често се използва увеличение 100×, докато за детайлно броене и разграничаване на по-фини частици се предпочита 400× или 1000×. Осветлението също играе съществена роля. Яркото поле е най-често използвано, но при прозрачни или слабо контрастни частици фазовият контраст може значително да подобри видимостта. Важно е микроскопът да бъде калибриран, а операторът да е запознат с реалните размери на полето на наблюдение, тъй като те участват в изчисленията на концентрацията.

Същинското броене на частиците може да се извърши по няколко методики, като изборът зависи от целта на анализа и характеристиките на пробата. Най-разпространен е методът на броене по полета. При него операторът избира определен брой случайни или систематично разположени полета върху филтъра. Във всяко поле се преброяват всички видими частици, като при необходимост се класифицират по размер или морфология. Този подход позволява екстраполация към цялата площ на филтъра, като се приема, че разпределението на частиците е приблизително равномерно.

Друг широко използван подход е броенето с окулярна решетка. В окуляра се поставя микрометрична решетка, разделена на квадранти. Операторът брой частиците само в определени клетки, което улеснява стандартизацията и намалява субективността. Този метод е особено полезен при високи концентрации на ФПЧ, когато броенето на цялото поле би било твърде трудоемко.

Микроскопският анализ позволява не само количествено определяне, но и морфологична интерпретация. Различните типове частици имат характерни форми:

- сажди – агломерирани, дендритни структури;
- минерален прах – ъгловати, непрозрачни частици;
- полени – сферични, с орнаментирана повърхност;
- влакна – удължени, цилиндрични структури.

Концентрацията на частиците се изчислява чрез формулата:

$$C = \frac{N \cdot A_f}{A_c \cdot V} \quad (1)$$

Където: N – брой преброени частици

A_f – площ на филтъра

A_c – площ на наблюдаваното поле

V – обем на преминалия въздух

Класификация и идентификация на източниците.

Морфологичният анализ чрез електронна микроскопия позволява класифицирането на замърсителите в няколко основни категории, пряко свързани с техния произход:

Сферични частици (Fly ash): Гладката сферична форма е сигурен индикатор за високотемпературни горивни процеси, характерни за промишлени пещи и ТЕЦ.

Сажди и въглеродни агрегати: Верижните и разклонени структури от наноразмерни въглеродни сфери са типичен маркер за емисии от дизелови двигатели и изгаряне на твърдо гориво.

Частици с неправилна и остра форма (McCrone, W. C., & Delly, J. G. 2002): Кристалните и ъгловати структури обикновено произхождат от строителни дейности, механично износване на пътната настилка или почвена ерозия.

Независимо от избрания метод, често се налага класифициране на частиците по размерни класове (ISO 7708:1995). Това позволява да се разграничат фракциите PM_{10} , $PM_{2.5}$ и ултрафините частици. Макар оптичният микроскоп да има ограничения при наблюдение на частици под 1 μm , той остава ефективен за по-големите фракции. Размерът на частиците се определя чрез сравняване с калибрирана скала или чрез използване на дигитално изображение и софтуер за измерване.

След приключване на броенето се преминава към изчисляване на концентрацията. Обикновено се използва формула, която свързва броя на преброените частици, площта на

наблюдаваните полета, общата площ на филтъра и обема на преминалия въздух. Така се получава стойност, която може да бъде изразена като брой частици на кубичен метър въздух. Този подход позволява сравнение между различни проби и периоди, както и оценка на тенденции в замърсяването.

Последният етап е документацията и интерпретацията на резултатите. Освен числените данни, микроскопският анализ предоставя ценна информация за формата и структурата на частиците. Например саждите имат характерна агломерирана структура, минералните прахове са по-ъгловати, а полените имат ясно разпознаваеми морфологични особености. Тези наблюдения могат да помогнат за определяне на източниците на замърсяване – транспорт, битово отопление, индустрия или природни процеси (U.S. EPA. 2016).

Според изследване (Zheleva, I., E.Veleva, M. Filipova), което то се фокусира върху качеството на въздуха в град Русе въз основа на данни от мониторингови станции, събирани в периода от октомври 2015 г. до май 2017 г. Основният и най-опасен замърсител на въздуха в региона са фините прахови частици с диаметър под 10 микрометра (ФПЧ₁₀ или РМ₁₀). Стойностите на РМ₁₀ системно надвишават законовите норми: както средногодишната норма от 40 µg/m³, така и среднодневната норма от 50 µg/m³. Най-сериозното превишаване на нормите се наблюдава през зимните месеци (януари, февруари, ноември и декември). Екстремни стойности: В станция 2 (разположена в ж.к. „Здравец изток“) е регистрирана максимална стойност на РМ₁₀ от 217.30 µg/m³, което надвишава среднодневната норма 4.35 пъти. Според авторите, основната причина за високото замърсяване през зимата не е толкова индустриалната дейност, колкото битовото отопление на твърдо гориво и автомобилният транспорт. За да анализират и прогнозираят нивата на РМ₁₀, авторите използват статистическия метод ARIMA (Auto-Regressive Integrated Moving Average). След прилагане на логаритмична трансформация на данните за стабилизиране на дисперсията, те установяват, че авторегресионен модел от първи ред – AR(1) – дава отлични резултати. Изграденият модел съвпада много добре с реално измерените стойности и е оценен като надежден инструмент за краткосрочно прогнозиране на замърсяването с фини прахови частици в града. Авторите правят връзка между замърсяването на въздуха и основните атмосферни характеристики в региона – температура, атмосферно налягане и влажност. Силното замърсяване през есенно-зимния сезон се разглежда като възможен фактор, допринасящ за отчетеното леко покачване на средните температури в района на Русе през последните десетилетия. Заключение е, че замърсяването на въздуха вероятно влияе върху локалния климат, но тази взаимовръзка изисква допълнителни и по-задълбочени проучвания в бъдеще.

Таблица 1. Базови статистически стойности на параметрите на замърсителите над град Русе

Pollutant	N	Minimum	Maximum	Mean	Std. deviation	Skewness	Kurtosis
SO ₂	229	5.80	22.20	8.9978	2.65379	2.066	4.933
NO ₂	561	0.00	65.40	22.2905	10.11444	1.360	2.429
NO	561	0.00	211.90	10.3196	15.86743	5.899	54.482
CO	561	0.00	3.50	0.5009	0.35869	2.686	11.823
O ₃	233	7.70	71.60	38.7997	15.79360	- 0.017	- 0.893
PM ₁₀	541	0.00	176.00	43.9424	26.42935	1.937	4.499
C ₆ H ₆	557	0.00	12.90	0.9050	1.03537	4.993	42.346
PM _{2,5}	559	0.00	161.10	26.9677	22.68468	2.435	6.994

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Микроскопският анализ предоставя качествено ново измерение в изследването на атмосферното замърсяване. Комбинирането на количествените данни от автоматичните измервателни станции със структурния и елементарен анализ от електронната микроскопия позволява прецизно дефиниране на източниците на замърсяване. Интегрирането на тези методи в редовния екологичен мониторинг е критична стъпка за формулирането на целеви политики за подобряване на качеството на въздуха в градската среда.

Методологията за броене на ФПЧ с оптичен микроскоп представлява комбинация от внимателна подготовка, прецизно наблюдение и аналитичен подход. Макар да изисква време и опит, тя предоставя уникална перспектива към характеристиките на аерозолните частици, която не може да бъде постигната само чрез автоматични измервателни станции. Този метод остава ценен инструмент в научните изследвания, екологичния мониторинг и образователната практика, като позволява на изследователя да „види“ замърсяването в буквалния смисъл.

REFERENCES

Baron, P. A., & Willeke, K. (Eds.). (2001). *Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications*. Wiley-Interscience.

Hinds, W. C. (1999). *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*. Wiley.

ISO 7708:1995. (1995). *Air quality — Particle size fraction definitions for health-related sampling*. International Organization for Standardization.

McCrone, W. C., & Delly, J. G. (2002). *The Particle Atlas* (2nd ed.). McCrone Research Institute.

U.S. EPA. (2016). *Air Quality Criteria for Particulate Matter*. Environmental Protection Agency.

WHO. (2021). *WHO Global Air Quality Guidelines*. World Health Organization.

Zheleva, I., E. Veleva, M. Filipova. *Analysis and Modeling of Daily Air Pollutants in the City of Ruse*, FRI-19.206-1-EC-07 Bulgaria. 2023